DÉFICIT HÍDRICO NA CULTURA DO TRIGO E O IMPACTO NA RESPOSTA ESPECTRAL E EM PARÂMETROS AGRONÔMICOS

MAURICIO ALVES MOREIRA

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Rubens Angulo Filho

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Fevereiro - 1997

Dados Internacionais de catalogação na publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - Campus "Luiz de Queiroz"/ USP

Moreira, Mauricio Alves

**Déficit hídrico na cultura do trigo e o impacto na resposta espectral e em
parâmetros agronômicos/ Mauricio Alves Moreira. -- Piracicaba, 1997.**
142 p. : il.

Tese (doutorado) -- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997.
Bibliografia.

1. Déficit hídrico (efeito) 2. Radiação 3. Sensoriamento remoto 4. Trigo I.
Título

CDD 633.11

DÉFICIT HÍDRICO NA CULTURA DO TRIGO E O IMPACTO NA RESPOSTA ESPECTRAL E EM PARÂMETROS AGRONÔMICOS

MAURICIO ALVES MOREIRA

Aprovada em: 15.04.1997

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Rubens Angulo Filho	ESALQ/USP
Prof. Dr. Marcos Vinicius Folegatti	ESALQ/USP
Prof. Dr. Ricardo Ferraz de Oliveira	ESALQ/USP
Prof. Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff	INPE/SJCAMPOS
Prof. Dr. Zacarias Xavier de Barros	UNESP/BOTUCATU

Prof. Dr. RUBENS ANGULO FILHO
Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha esposa, Tânia Mara Said Moreira, pela sua compreensão, amor e o apoio moral, durante todo o tempo em que estive envolvido com o doutoramento. Em segundo lugar, agradeço às minhas filhas: Patrícia, Camila e Mariana, por terem entendido que nossa ida para Piracicaba foi muito importante para as nossas vidas.

Gostaria ainda de deixar aqui os meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas e instituições:

Aos meus pais: Maria do Carmo Silva e Francisco Moreira de Silva (*in memoriam*), pela vida árdua e sacrificada para criar e educar seus filhos.

Ao Prof. Dr. Rubens Angulo Filho, pelo apoio, entusiasmo, orientação e encorajamento para que este trabalho fosse concluído.

Ao Prof. Dr. Marcos Vinícius Folegatti, em colocar à minha disposição a área onde foi instalado o experimento e pelo interesse demonstrado sobre o tema abordado nesta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Vettorazzi, pela amizade e o convívio neste bons tempos de universidade;

Ao Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff, pelo apoio na coleta e processamento dos dados e pelas valiosas sugestões na redação deste trabalho;

Ao Dr. Antônio Roberto Formaggio, pela amizade e pela preocupação em solucionar os meus problemas pessoais;

Ao Dr. José Carlos Neves Epiphanyo pela amizade e pelo incentivo demonstrado, colocando à minha disposição facilidades para que este trabalho fosse concluído;

Ao físico, Carlos Alberto Steffen pelo apoio na coleta e processamento dos dados radiométricos;

Aos amigos e desenhistas, Silvio Coimbra e Joaquim Godoy Filho, pela colaboração na confecção de desenhos;

A todos os meus colegas de cursos e professores nos quais muito me espelhei para realizar este doutorado;

Ao Instituto Agronômico de Campinas, na pessoa do Dr. José Guilherme de Freitas, pelo fornecimento da semente e assessoria técnica sobre o cultivo do trigo;

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento do espectrorradiômetro "SPECTRON SE-590" o qual foi utilizado para obter as medidas radiométricas sobre o dossel da cultura do trigo;

Ao INPE, nas pessoas do Eng^o Márcio Nogueira Barbosa, da Dra. Thelma Krug e do Dr. Vieira Dias, por terem me propiciado esta oportunidade de crescimento profissional.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro durante minha estadia em Piracicaba.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Água na Produção Agrícola	4
2.1.1 Disponibilidade de água para as plantas	5
2.1.2 Absorção e perda de água pelas plantas	6
2.2 Estresse Hídrico na Planta	8
2.2.1 Efeito do estresse hídrico no desenvolvimento do trigo	9
2.3 Balanço de Água no Solo e Determinação da Seca Agrônômica	11
2.4 Considerações sobre Radiação Solar	12
2.5 Propriedade Óptica da Folha	15
2.5.1 Região do visível do espectro eletromagnético	15
2.5.2 Região do infravermelho do espectro eletromagnético	16
2.5.3 Fatores que afetam as propriedades ópticas da folha	18
2.5.3.1 Estrutura anatômica	18
2.5.3.2 Idade	18
2.5.3.3 Nutrientes	20
2.5.3.5 Conteúdo de água	21
2.6 Dossel Vegetativo	22
2.7 Interações da Radiação Solar com Dosséis Agrícolas	23
2.8 Radiometria	26
2.8.1 Medida da reflectância de dosséis agrícolas	27
2.9 Índice de Vegetação	32

2.10 Radiação Fotossinteticamente Ativa Interceptada e Absorvida pelo Dossel Vegetativo	35
2.11 Eficiência do Uso da Radiação	38
3 MATEIRAL E MÉTODOS	42
3.1 Área de Estudo	42
3.1.1 Local	42
3.1.2 Clima	42
3.1.3 Solo	43
3.2 Delineamento Experimental	45
3.3 Variedade de Trigo	48
3.4 Preparo do Solo e Semeadura	48
3.5 Manejo da Irrigação	49
3.6 Balanço de Água no Solo e Caracterização dos Dias “Secos”	51
3.7 Medidas Radiométricas sobre o Dossel da Cultura do Trigo	56
3.7.1 Cálculo do fator de reflectância	60
3.8 Estimativa da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida	61
3.9 Cálculo da Eficiência do Uso da Radiação	62
3.10 Índice de Área Foliar	63
3.11 Coleta de Dados Agronômicos	63
3.12 Análises Estatísticas	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1 Balanço da Água no Solo e Determinação dos Dias “Secos”	67
4.2 Efeito do Estresse Hídrico sobre a Resposta Espectral nas Bandas TM ₃ e TM ₄ e sua Transformação para o NDVI.....	74
4.2.1 Análise do FR nas bandas TM ₃ e TM ₄ e do NDVI para o tratamento 2 (perfilhamento).....	79
4.2.2 Análise do FR nas bandas TM ₃ e TM ₄ e do NDVI para o tratamento 3 (espigamento).....	81
4.2.3 Análise do FR nas bandas TM ₃ e TM ₄ e do NDVI para o tratamento 4 (enchimento de grão).....	84

4.2.4 Análise do FR nas bandas TM ₃ e TM ₄ e do NDVI para o tratamento 5 (maturação).....	86
4.3 Efeito do Déficit Hídrico na Eficiência do Uso da Radiação Fotossinteticamente Ativa	87
4.4 Déficit Hídrico e sua Relação com Parâmetros Agronômicos	89
5 CONCLUSÕES	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
Apêndice A: Legenda da escala Feeks e Large para a cultura do trigo	115
Apêndice B: Transformação da radiação global em MJ m ⁻² d ⁻¹	117
Apêndice C: Balanço da água no solo e caracterização dos dias “secos”	119
Apêndice D: Resultados do teste t para pares de observações	124
Apêndice E: Resultados da análise de variância e do teste LSD para germinação (G); comprimento (C); largura (L) e espessura (E) do grão	137
Apêndice F: Dados meteorológicos coletados na estação meteorológica da ESALQ/USP nos meses de junho, julho e agosto.....	139

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Curva de irradiância solar	13
2 O espectro eletromagnético	15
3 Espectro de absorção para três pigmentos fotossintetizantes: clorofila a, clorofila b e β -caroteno	16
4 Reflectância de folhas de algodão superpostas até uma camada de seis folhas	17
5 Principais características da resposta espectral de uma folha verde	18
6 Curvas de reflectância espectral de folhas de plantas obtidas durante a fase de crescimento vegetativo (folhas verdes) e durante a senescência.	19
7 Curvas de reflectância espectral obtidas em folhas de milho, com diferentes conteúdos de água	21
8 Geometria da radiação no alvo para a definição da reflectância bicônica.....	29
9 Esquema do delineamento experimental: disposição dos blocos e das parcelas dentro da área de estudo.....	46
10 Armação de madeira para proteção da água de chuva sobre as parcelas sem irrigação	47
11 Parcela sem irrigação coberta com a lona plástica para proteção de águas de chuvas	47
12 Esquema de obtenção de medida da radiância (alvo-referência) para a aquisição do fator de reflectância do trigo em condições de campo.....	58
13 Tomada de dados radiométricos sobre uma parcela de trigo.....	59
14 Balanço da água no solo no período de 163 a 191	68
15 Balanço da água no solo no período de 191 a 221	68
16 Balanço da água no solo no período de 219 a 235	69
17 Balanço da água no solo no período de 235 a 249	69
18 Fator de reflectância na banda TM ₃ , obtido ao longo do ciclo da cultura do trigo, para os diferentes tratamentos	75

19	Fator de reflectância na banda TM ₄ , obtido ao longo do ciclo da cultura do trigo, para os diferentes tratamentos	76
20	Índice de área foliar, obtido para os cinco tratamentos, do perfilhamento até o início da maturação.	77
21	Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtido ao longo do ciclo da cultura do trigo, para os diferentes tratamentos	78
22	Curvas do fator de reflectância para o tratamento 2 e a testemunha do dia 09/08/95, ilustrando as diferenças do FR nas bandas TM ₃ e TM ₄	80
23	Curvas do fator de reflectância para o tratamento 3 e a testemunha do dia 13/08/95, ilustrando as diferenças do FR nas bandas TM ₃ e TM ₄	83
24	Curvas do fator de reflectância para o tratamento 4 e a testemunha do dia 20/08/95, ilustrando as diferenças do FR nas bandas TM ₃ e TM ₄	85
25	Curvas do fator de reflectância para o tratamento 4 e a testemunha do dia 28/08/95, ilustrando as diferenças do FR nas bandas TM ₃ e TM ₄	86

LISTA DE TABELAS

Página

1	Dados médios de: precipitação, radiação global, umidade relativa, temperatura máxima, insolação e evaporação do tanque classe “A” (E.C.A).	43
2	Características químicas do solo da área de estudo nas profundidades de 15 e 20 cm para fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, cálcio, magnésio, alumínio + hidrogênio, alumínio, soma de bases, capacidade de troca de cátions e índice de saturação por base	44
3	Características físicas do solo na profundidade de 20 cm	44
4	Unidade volumétrica nas diversas tensões na profundidade de 20 cm	45
5	Período de tempo em que cada tratamento foi submetido à suspensão da água e os estádios fenológicos na escala Feekes e Large (Schreeren, 1986)	45
6	Coeficiente (K) para estimar a evapotranspiração do trigo irrigado a partir da evaporação da água no tanque classe “A” em função do estágio de desenvolvimento da cultura	50
7	Valores médios de temperatura máxima (°C), umidade relativa (%) e velocidade do vento a dois metros de altura (m/s), para o período entre a suspensão de água e o primeiro dia “seco”, nos diferentes tratamentos	70
8	Evapotranspiração máxima (ET _m), evapotranspiração real (ET _r), déficit hídrico (ET _m - ET _r) e lâmina de água (mm) calculados após o primeiro dia “seco” para os diferentes tratamentos	72
9	Valores médios de temperatura máxima (T _{máx.}), umidade relativa (UR), e velocidade do vento a dois metros (U ₂) após atingir o primeiro dia seco para os diferentes tratamentos	72
10	Análise de variância para radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (AAPAR), eficiência do uso da radiação para produção de fitomassa (ϵ_F) e eficiência do uso da radiação para a produção de grãos (ϵ_G).....	87

11	Análise de variância para altura média de planta (AMP), número de espigas por metro quadrado (NEMQ), semente por espiga (SPE), peso de mil grãos (PMG), produção de fitomassa (Fito) e produção de grãos (GRÃO) e índice de colheita (IC) e produção de proteína (PROT)	91
12	Análise de variância para o conteúdo dos macronutrientes (N,P, K, Ca e Mg) na semente de trigo para os cinco tratamentos	93
A.1	Legenda da escala Feekes e Large para a cultura do trigo	116
B.1	Transforção da radiação global em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$	118
C.1	Balanço Hídrico Modificado (BHM) para caracterização dos dias secos no período de 12/06 a 10/07. (tratamento 2)	120
C.2	Balanço Hídrico Modificado (BHM) para caracterização dos dias secos no período de 10/07 a 10/08. (tratamento 3)	121
C.3	Balanço Hídrico Modificado (BHM) para caracterização dos dias secos no período de 07/08 a 23/08. (tratamento 4)	122
C.4	Balanço Hídrico Modificado (BHM) para caracterização dos dias secos no período de 23/08 a 06/09. (tratamento 5)	123
D.1	Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM_3 , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamentos 1 e 2)	125
D.2	Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM_4 , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 2)	126
D.3	Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamentos 1 e 2)	127

D.4 Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM ₃ , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 3).	128
D.5 Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM ₄ , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 3)	129
D.6 Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 3)	130
D.7 Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM ₃ , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 4)	131
D.8 Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM ₄ , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 4).	132
D.9 Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 4)	133

D.10 Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM ₃ , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 5)	134
D.11 Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM ₄ , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 5)	135
D.12 Resultados da média (d), do desvio padrão da média (d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t ($ t $) e da probabilidade de rejeição da média (d) para o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura. (tratamentos 1 e 5)	136
E.1 Análise de variância e do teste LSD para germinação (G), comprimento (C), largura (L) e espessura (E) do grãos	138
F.1 Dados meteorológicos do mês de junho	140
F.1 Dados meteorológicos do mês de julho	141
F.1 Dados meteorológicos do mês de agosto.....	142

À minha esposa Tânia e minhas filhas:
Patrícia, Camila e Mariana
“Dedico”

Aos meus Pais
“Ofereço”

DÉFICIT HÍDRICO NA CULTURA DO TRIGO E O IMPACTO NA RESPOSTA ESPECTRAL E EM PARÂMETROS AGRONÔMICOS

Autor: MAURICIO ALVES MOREIRA

Orientador: PROF. DR. RUBENS ANGULO FILHO

RESUMO

Diversos trabalhos de pesquisa, em sua maioria, realizados em casa de vegetação em regiões de clima temperado, revelam que o rendimento da cultura do trigo (*Triticum aestivum*, L.) é afetado pelo estresse hídrico, especialmente, nos estádios de floração e enchimento de grãos. Alguns trabalhos com trigo têm demonstrado que a técnica de sensoriamento remoto apresenta potencial para estimar a queda de produção decorrente do estresse hídrico, através de medidas radiométricas na faixa termal do espectro eletromagnético. Entretanto, há uma carência de estudos realizados ao nível de campo, em condições de clima subtropical, que relacionam o uso das técnicas de sensoriamento remoto, nas faixas visível e infravermelho próximo, com os efeitos do estresse hídrico na produção de grãos. A presente pesquisa teve por objetivo submeter o cultura do trigo ao estresse hídrico em diferentes fases do ciclo de crescimento e desenvolvimento e analisar o seu efeito no comportamento espectral, na eficiência do uso da radiação para produção de fitomassa e grãos e outros componentes de produção. Foi instalado um experimento de campo, durante a safra de inverno de 1995 na área experimental de irrigação do Departamento de Engenharia Rural na Fazenda Areão, da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), em Piracicaba, SP. O experimento foi em blocos ao acaso e consistiu de cinco tratamentos com três repetições cada: a) testemunha, com suplementação de água durante todo o ciclo da cultura a fim de manter a evapotranspiração real (ET_r) igual a evapotranspiração máxima (ET_m); b) estresse hídrico durante o perfilhamento, com suspensão da água por 29 dias; c) estresse hídrico durante o espigamento, com suspensão da água por 31 dias; d) estresse hídrico durante o enchimento de grãos, com suspensão da água por 17 dias e; e) estresse hídrico durante a maturação, com

suspensão da água por 17 dias. Utilizou-se como modelo o cultivar IAC-287 'YACO', de ciclo precoce com duração de 115 a 120 dias. O trigo foi semeado em 1º de junho de 1995 com um espaçamento entre linhas de 0,17 m e uma densidade de 70 a 80 sementes por metro linear. Medidas radiométricas nas faixas visível e infravermelho próximo foram obtidas quase que diariamente com a finalidade de se obter os valores do fator de reflectância (FR) nas bandas TM_3 e TM_4 e o índice vegetativo diferença normalizada (NDVI). Os valores de NDVI foram utilizados para estimar a radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (AAPAR) para permitir o cálculo da eficiência do uso da radiação da cultura para grãos (ϵ_g) e fitomassa (ϵ_f). De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa foi constatado que o estresse hídrico afetou o comportamento espectral do trigo nas bandas TM_3 e TM_4 , de forma significativa, porém variou em função do estágio de desenvolvimento da cultura. O estresse hídrico, quando aplicado durante a fase inicial de crescimento da cultura (perfilhamento) e durante a fase de enchimento de grãos, reduziu a eficiência do uso da radiação para a produção de fitomassa em 22,8 e 15,4%, respectivamente, em relação à testemunha. O efeito do estresse hídrico quando aplicado durante o perfilhamento, espigamento e enchimento de grãos, reduziu a eficiência do uso da radiação para produção de grãos em 21,1; 22,2 e 22,2 %, respectivamente, em relação à testemunha. O índice de colheita (IC) foi reduzido em 19% pelo estresse hídrico durante o estágio de enchimento de grãos, em relação à testemunha. Em menor intensidade o IC foi reduzido quando o estresse hídrico foi aplicado nas fases de espigamento (7,5%, $p < 0,05$) e de maturação (7,9%, $p < 0,05$). Observa-se que na fase de perfilhamento o estresse hídrico provocou uma redução na eficiência do uso da radiação (ϵ_f) e (ϵ_g), porém o valor do IC foi semelhante ao da testemunha. Isto indica que quando o estresse hídrico ocorre na fase inicial de desenvolvimento, a cultura não foi capaz de recuperar a fitomassa nos estádios posteriores. Além da produção de fitomassa e de grãos outros parâmetros agrônômicos de produção afetados pelo estresse hídrico foram: altura de planta, número de espiga por metro quadrado, número de sementes por espiga, peso de 1000 grãos, produção de proteína, largura e espessura do grão.

DROUGHT STRESS IN WHEAT CROP AND THE IMPACT ON SPECTRAL RESPONSE AND AGRONOMICS PARAMETRES

Author: MAURICIO ALVES MOREIRA

Adviser: Dr. Rubens Angulo Filho

SUMMARY

Several studies performed in greenhouses located in regions with temperate climate, have revealed that grain yield in wheat (*Triticum aestivum*, L.) crop is affected by drought stress, especially, during flowering and grain fill growth stages. Some studies with wheat have demonstrated that the remote sensing technique presents a potential to estimate the production decrease in response to drought stress, using radiometric measurements in the thermal region of the electromagnetic spectrum. However, there is a lack of studies conducted at field level, in subtropical climate, that establish a relationship between the use of remote sensing techniques, in the visible and near infrared bands, with the effects of drought stress on grain yield production. The present research had the objective to grow wheat crop under drought stress, at different growth stages, and analyze its effect on spectral behavior, photochemical efficiency, grain yield and phytomass production, and others crop yield components. An experiment was installed at the experimental irrigation field in the Areão farm from the Department of Rural Engineering, College of Agriculture (ESALQ/USP) at Piracicaba, São Paulo State, during the winter season of 1995. The experiment was a randomized complete block design with three replicates for each of five treatments that consisted of: a) control treatment supplied with water during the whole crop season in order to maintain the actual evapotranspiration (ET_r) equal to the maximum evapotranspiration (ET_m); b) water stress imposed during initial growth and tillering over a period of 29 days; c) water stress imposed during booting stage over a period of 31 days; d) water stress imposed during grain fill stage over a period of 17 days and e) water stress imposed during ripening over a period of 17 days. A

wheat cultivar, with a short growing cycle of 115 to 120 days, named IAC-287 'YACO', was used as model. It was sown on 01 June 1995 in rows spaced 0.17 m apart with a seed rate of 70 to 80 seeds per meter of row. Radiometric measurements, in the visible and near infrared, were acquired on a daily basis as weather permitted, in order to obtain the reflectance factor (FR) values for the TM₃ band, the TM₄ band and the normalized difference vegetation index (NDVI). The NDVI values were used to estimate the accumulated absorbed photosynthetically active radiation (AAPAR) in order to calculate the radiation use efficiency for grain yield (ϵ_G) and phytomass (ϵ_F). The harvest index (IC) was obtained by the ratio between grain yield and total above ground phytomass. The study allowed to observe that the FR values for TM₃ and TM₄ bands presented variable results, as a function of the crop growing stage in which the water stress was applied, without the presence of a well defined pattern. Radiation use efficiency for phytomass was reduced when water stress was applied during initial growth and during grain fill stage (tillering) by 22.8 and 15.4% of control, respectively. The harvest index was reduced by 19% of control in response to water stress during booting stage (7.5% of control, $p < 0.05$) and ripening stage (7.9% of control, $p < 0.05$). It was noted that wheat plants grown under water stress during tillering or initial growth stage had reduced radiation use efficiency; however, the harvest index value was similar to the control treatment. This indicates that plants subjected to water stress, at initial growth, were not able to recover, later during the season, from their initial phytomass loss. Besides phytomass and grain yield production, other agronomic parameters affected by the water stress were: plant height, number of spikes m⁻², number of seeds spikes⁻¹, weight of 1000 grains, protein production and grain width and thickness.

1 - INTRODUÇÃO

No Brasil, o trigo é cultivado na região centro-sul durante o período que vai de meados do outono até o final do inverno, época que se observa, com muita frequência, uma sensível redução da precipitação pluvial. Em geral, o trigo é cultivado sob regime de sequeiro e sem irrigação complementar. Em anos de estiagem prolongada a cultura fica sujeita ao estresse hídrico prejudicando o seu desenvolvimento e crescimento, acarretando, com isto, quebra na produção. Resultados de muitas pesquisas, em sua maioria, realizadas em casa de vegetação, indicam que a quebra de produção de grãos de trigo pode ser bastante significativa, especialmente, quando o estresse hídrico ocorre as fases de reprodução e de enchimento de grãos. Diante desta situação, percebe-se que para estimar produção de trigo deve-se considerar, entre outros fatores, o efeito do estresse hídrico em diferentes estádios fenológicos na produtividade do trigo.

Obter informações de estresse hídrico, através de métodos tradicionais de coleta de dados no campo, é uma tarefa muito difícil porque requer um levantamento exaustivo das condições de manejo da água em cada área cultivada, o que torna o processo oneroso e demorado.

A partir da década de 70, com a colocação de sensores a bordo de satélites orbitais para registrar informações espectrais acerca de objetos (alvos) na superfície terrestre, muitas pesquisas, na área de agricultura, têm sido desenvolvidas no sentido de verificar a viabilidade da utilização destes dados para auxiliar em sistemas de previsão de safras de culturas agrícolas. No início, as pesquisas foram mais direcionadas na identificação e mapeamento de áreas agrícolas. Dentre os projetos mais conhecidos, de emprego de dados de sensoriamento remoto

na área de agricultura, pode-se citar o CITARS (“Crop Identification Technology Assessment by Remote Sensing”), o LACIE (“Large Area Crop Inventory Experiment”) e o AgRISTARS (“Agriculture and Resources Inventory Surveys Through Aerospace Remote Sensing”).

A partir da década de 80, muitos esforços têm sido dedicados no emprego de dados coletados através de técnicas de sensoriamento remoto para estimar a produtividade de fitomassa e/ou grãos para várias culturas agrícolas. Na literatura encontram-se resultados de várias pesquisas, na sua maioria realizadas em regiões de clima temperado, que indicam que em plantas saudáveis e devidamente supridas com água e nutrientes, há uma relação linear positiva entre a produção de fitomassa e/ou grãos com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel das mesmas. Monteith (1977) foi o primeiro a propor um modelo para estimar o peso seco de fitomassa em culturas agrícolas, com base na radiação total incidente, na radiação fotossinteticamente ativa absorvida ou interceptada pelo dossel e no uso eficiente da radiação, durante o ciclo da cultura.

Para estimar a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida ou interceptada pelo dossel de uma cultura emprega-se, em geral, duas abordagens. A primeira consiste em utilizar equipamentos que registram somente a radiação dentro da faixa espectral que vai de 400 a 700 nm, como é o caso do emprego de sensores quânticos. Nessa abordagem, mede-se a radiação acima e abaixo do dossel da cultura. Embora apresente bons resultados ela é inviável para ser empregada em grandes regiões agrícolas, pois requer um número grande de medidas o que inviabilizaria o método. A segunda abordagem que vem sendo estudada, e que tem sido considerada como uma metodologia capaz de contornar os problemas mencionados na primeira abordagem, é o emprego de índices de vegetação, obtidos a partir de medidas espectrais de dosséis agrícolas, nas regiões do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, para estimar a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida. Conhecendo-se a radiação incidente e a fração da radiação absorvida pode-se estimar a quantidade de radiação absorvida

durante o ciclo da cultura, a qual está relacionada com a produção de fitomassa ou de grãos.

Considerando que a maioria dos satélites meteorológicos e de recursos naturais dispõem de sensores que captam informações da superfície terrestre nas regiões do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, pode-se obter os índices de vegetação a partir de dados de sensoriamento remoto orbita sobre grandes áreas. Entretanto, poucos trabalhos têm sido feitos para verificar esta relação em plantas submetidas ao estresse hídrico durante o ciclo de crescimento e de desenvolvimento das culturas.

Do ponto de vista agrônomo, na literatura encontra-se vários trabalhos realizados, também, em sua maioria em regiões de clima temperado e em casa de vegetação, cujos resultados enfatiza bem a importância da água na produção de grãos de trigo, para diversas variedades e/ou cultivares. No Brasil, destacam-se as pesquisas realizadas no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Seção de Arroz e Cereais de Inverno, para diversas variedades e/ou cultivar de trigo.

A presente pesquisa insere-se neste contexto, ou seja, visa analisar o efeito do estresse hídrico na cultura do trigo, quando aplicado em diferentes estádios fenológicos, no que diz respeito ao comportamento espectral, eficiência do uso da radiação para produção de fitomassa e grãos, além de outros fatores tais como: altura de planta, número de espiga por metro quadrado, sementes por espiga; peso de mil grãos; índice de colheita, produção de proteína no grão; percentagem de germinação; comprimento, largura e espessura do grão.

2 . REVISÃO DE LITERATURA

A produção agrícola é o resultado da ação integrada do solo, da planta e do meio externo. Cabe ao solo fornecer as condições necessárias para o bom desenvolvimento das plantas tais como: água, oxigênio, permeabilidade às raízes, pH adequado e nutrientes. A planta cabe contribuir com o potencial genético, enquanto que ao meio externo cabe o fornecimento de CO_2 , O_2 , luz e calor, entre outros.

2.1. Água na Produção Agrícola

A água é o componente do solo mais importante num sistema de produção agrícola, do ponto de vista de manejo. Taiz & Zeiger (1991) relatam que embora sendo a água o recurso ambiental mais abundante é, ao mesmo tempo, o maior limitante para a produção agrícola. Em muitas regiões do planeta a agricultura só é viável através de práticas de irrigação.

Embora a proporção de água e terra no nosso planeta seja de 2 para 1, Reichardt (1993) comenta que cerca de 98% da água é salgada. Portanto, imprópria para o consumo direto pelas plantas e animais. Dos 2% restantes, 1,986 % está retido nas calotas polares e apenas 0,014 % está prontamente disponível para os animais e vegetais, que habitam outras partes do planeta.

As plantas, de modo geral, absorvem centenas de gramas de água para cada grama de matéria seca produzida. Entretanto, cerca de 98% do volume absorvido é perdido para a atmosfera, no processo de transpiração. Mesmo assim, em algumas espécies, como as herbáceas, cerca de 80 a 90% de seu peso constitui-se de água e, nas lenhosas, superior a 50% (Taiz & Zeiger, 1991; Reichardt, 1993).

Por outro lado, a água em excesso modifica a relação água/ar no solo em pelo menos quatro diferentes aspectos: a) restrição no crescimento dos vegetais, principalmente, do sistema radicular; b) queda na absorção de nutrientes; c) queda na absorção de água e d) formação de certos compostos tóxicos ao crescimento vegetal (Brady, 1979). No que diz respeito à falta de água ou déficit de água no solo, este assunto será tratado com maior ênfase mais adiante.

Na planta a água exerce as seguintes funções: a) meio de transporte de solutos orgânicos e inorgânicos; b) matéria-prima para a fotossíntese e processos hidrolíticos; c) solvente e meio para as reações químicas; d) hidratação e neutralização de cargas em moléculas coloidais; e) mantem o turgor celular e f) controla a temperatura na superfície das plantas através da transpiração (Gardner et al., 1985).

Com relação à cultura do trigo, Larcher (1975) e Woolhouse (1978), citados por Kirkham & Kanemasu (1985), relatam que para a produção de 1 grama de matéria seca foram necessários 540 gramas de água, porém os autores não especificam a variedade.

2.1.1. Disponibilidade de água para as plantas

Veihmeys & Hendrikson (1920), citados por Reichardt (1993), afirmaram que a água do solo é igualmente disponível num intervalo de umidade que vai de um limite superior, definido como capacidade de campo (CC), até um limite inferior, definido como ponto de murcha permanente (PMP).

Mais tarde, na década de 50, Richards & Waldleigh (1953), também citados por Reichardt (1993), em contrário às afirmações de Veihmeys & Hendrikson (1920), relataram que a disponibilidade da água para as plantas decresce com a diminuição da umidade do solo e que a planta pode sofrer deficiência de água e redução do crescimento, antes mesmo de alcançar o PMP.

Ainda segundo Reichardt (1993), outros pesquisadores não concordando com estes pontos de vista opostos, procuraram dividir a quantidade de

água disponível em dois intervalos: água imediatamente disponível e água decrescentemente disponível.

O problema tornou-se mais complexo quando se verificou que diferentes plantas respondem diferentemente à umidade do solo. Diante disso e, na tentativa de se criar uma metodologia padrão para quantificar a água no solo, que fosse aceita pela comunidade científica, procurou-se correlacionar o estado da água no solo e na planta em termos de potencial. Por isso, as constantes da água no solo foram definidas em termos de potenciais. Assim, para a CC atribuiu-se valores de -0,1 a -0,3 bar, dependendo do tipo de solo e, arbitrariamente de -15 bar para o PMP.

A água disponível para uma determinada cultura agrícola usualmente é determinada pela seguinte expressão (Tubelis & Nascimento, 1980; Ometto, 1981; Reichardt, 1993):

$$AD = \frac{(CC - PMP) \times ds \times Z}{100} \quad (1)$$

onde, AD é a água disponível no solo (mm), CC é o teor de água no solo na capacidade de campo (% em peso), PMP é o teor de água no solo no ponto de murcha permanente (% em peso), ds é a densidade do solo (g.cm^{-3}) e Z é a profundidade efetiva do sistema radicular, (mm).

De maneira geral, solos de textura mais fina, com maiores proporções de silte e argila, possuem maior capacidade de armazenamento de água. Entretanto, o tipo de argila é um fator muito importante no que diz respeito ao armazenamento de água. Por exemplo, solos com argila do tipo 2:1, como a vermiculita e a montmorilonita, apresentam ótimas propriedades de retenção de água, ao passo que as do tipo 1:1, como a caulinita, têm péssimas propriedades de reter água.

2.1.2. Absorção e perda de água pelas plantas

Toda superfície da planta pode absorver água. Todavia, nas plantas terrestres a água juntamente com sais minerais são absorvidos, fundamentalmente, pelas raízes. Com exceção dos cultivos hidropônicos, o solo é o principal reservatório da água, que é armazenada e fornecida às plantas na medida de suas necessidades. A

água move-se no sistema solo-planta-atmosfera em qualquer uma de suas fases. No solo e na planta, os principais movimentos dão-se na fase líquida, apesar dos fluxos de vapor assumirem grande importância quando o solo se encontra “mais seco” e em certas partes da planta, como no caso das câmaras estomáticas nas folhas (Reichardt, 1993).

Se há movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera, há gasto de energia para executar este trabalho. A física clássica reconhece duas formas de energia: a cinética e a potencial. Como o movimento da água no sistema é muito lento, sua energia cinética é desprezível. Logo, o movimento é caracterizado pela energia potencial que é descrita pela função termodinâmica energia livre de Gibbs e, que no sistema solo-planta-atmosfera, recebe o nome de potencial total da água ou simplesmente potencial da água, cuja unidade de medida é, usualmente, o bar ou pascal (Reichardt, 1993). O movimento da água tanto no solo quanto na planta se dá de locais de maior energia potencial para locais de menor energia potencial até que o equilíbrio se estabeleça (Gardner et al., 1985; Taiz & Zeiger, 1991; Reichardt, 1993).

O movimento da solução do solo (água mais minerais) para o interior das raízes pode-se dar por duas vias: a) apoplástica, onde a água se movimenta através das paredes celulares e espaços intercelulares em função da diferença de potencial. Neste caso, os solutos são arrastados (fluxo de massa) ou movem-se por difusão; b) simplasto, onde a água se movimenta através de membranas celulares de células vivas. O movimento se dá devido à diferença de potencial osmótico e os solutos movem-se por transporte ativo, isto é, transporte que envolve gasto de energia (Taiz & Zeiger, 1991; Reichardt, 1993).

A perda da água armazenada no solo ocorre através da evapotranspiração em função dos fatores ambientais e da planta. Segundo Gardner et al. (1985), o efeito do ambiente sobre a evapotranspiração é denominado de demanda atmosférica ou demanda evaporativa e os fatores que influenciam a demanda são: radiação solar, temperatura, umidade relativa e vento. Por outro lado, os fatores da planta que afetam a evapotranspiração são: arquitetura do dossel, quantidade de folhas, fechamento estomatal, número e tamanho dos estômatos, dobramento e enrolamento das folhas, expansão e profundidade do sistema radicular. Cerca de 5%

da água que sai da folha se dá através da cutícula. Com isso, o principal mecanismo de transferência de água da planta para atmosfera ocorre através dos estômatos sob a forma de vapor (Taiz & Zeiger, 1991).

2.2. Estresse Hídrico na Planta

Nos vegetais, o termo “estresse” caracteriza a ação de um fator externo que pode exercer uma influência negativa sobre a planta. Os fatores externos que mais comumente provocam estresse em culturas agrícolas são: excesso ou falta de água, deficiência nutricional, salinidade, radiação solar, temperatura alta ou baixa e injúrias causadas por insetos e pragas. Em muitos casos, o efeito do estresse é medido, utilizando parâmetros como: crescimento (acúmulo de fitomassa), assimilação de CO₂, nutrientes, entre outros (Taiz & Zeiger, 1991).

Nas condições naturais as plantas estão constantemente expostas a algum tipo de estresse. Por exemplo, mudanças na temperatura do ar podem tornar uma cultura estressada por alguns minutos, enquanto outros fatores podem estressar a planta por dias ou semanas (água no solo) ou até mesmo meses (alguns nutrientes).

Para Gardner et al. (1985) e Taiz & Zeiger (1991), muitas das pesquisas sobre efeitos de estresse hídrico têm sido realizadas sobre tecidos decepados da planta ou sobre plantas crescendo em vasos, com restrito volume de solo. Segundo os autores, há muitas evidências de que plantas crescendo em vasos respondem diferentemente ao déficit hídrico quando comparadas com aquelas crescendo em condições de campo. Plantas crescendo em menor volume de solo sofrem os efeitos do estresse hídrico mais rapidamente. Isto ocorre por duas razões básicas: maior densidade do sistema radicular (relação solo/raiz) e menor volume de água armazenada devido às limitações físicas. Com menor armazenamento de água e maior densidade do sistema radicular, o “esgotamento” da água é mais rápido e, conseqüentemente, o efeito do estresse hídrico se faz sentir mais rapidamente. Nas condições de campo, o sistema radicular não é uniformemente distribuído em todo perfil do solo. Geralmente, ele é mais denso na camada superficial do perfil, onde a disponibilidade de água é maior podendo ser extraída mais rapidamente. Porém,

quando a água se torna limitante, se não houver nenhuma restrição ao crescimento das raízes, elas se expandem para as camadas mais profundas do perfil do solo, onde a umidade é maior. Desta forma, no campo os efeitos do estresse hídrico são sentidos de forma muito mais gradual e isto possibilita que as plantas se adaptem ao déficit de água no solo.

2.2.1. Efeito do estresse hídrico no desenvolvimento do trigo

Com relação à cultura do trigo, a tolerância à seca ou a eficiência no uso da água podem ser avaliadas com base em medidas de certas características anatômicas e fisiológicas, tais como altura média (Sepaskhah et al., 1979), área foliar (Maria et al., 1982), número de espigas, peso da matéria seca, comprimento da espiga, número de espiguetas por espiga, número de grãos por espiga e peso do grão (Kirkham & Kanemasu, 1983; Freitas et al., 1985). Estas características podem correlacionar-se com a produção de fitomassa e grãos. Os efeitos do estresse hídrico sobre a produção de fitomassa e/ou grãos são numerosos e dependem muito do estágio de desenvolvimento e da duração do estresse.

O desenvolvimento da espiga no trigo é muito sensível ao efeito do estresse hídrico quando este ocorre no final da fase vegetativa, ou seja, durante o alongamento dos entrenós, próximo à emergência das espigas.

Para Oosterhuis & Cartwright (1983) e Meckel et al. (1984), os maiores efeitos do estresse hídrico na produção de grãos foram redução do número de grãos por espiga e aborto do embrião no início do enchimento do grão.

Palta et al. (1994) estudaram a remobilização de carbono e de nitrogênio, em cultura do trigo submetida ao estresse hídrico posterior à antese, e comentam que o nitrogênio total do grão não foi afetado pelo estresse, porque houve uma remobilização satisfatória do N armazenado na planta durante a pré-antese. No entanto, o mesmo não aconteceu com o carbono que sofreu uma redução na assimilação de 57%, durante o estresse hídrico, enquanto a remobilização foi somente de 36%. De acordo com Kiniry (1993), quando ocorre um severo estresse de

água depois da antese do trigo, o crescimento do grão torna-se mais dependente da remobilização dos carboidratos estocados em estádios anteriores.

Barlow et al. (1980) comentam que as relações do potencial da água no grão do trigo com outros órgãos da planta, quando a cultura foi submetida ao estresse hídrico, não foram afetadas até um potencial de água no grão de -5 MPa. No entanto, o potencial da água na folha bandeira caiu rapidamente, quando o estresse de água foi aplicado na fase de enchimento de grãos, mostrando a importância desta folha na remobilização de água para o grão.

Freitas et al. (1985) estudaram o efeito de três faixas de umidade na evapotranspiração real e na produção de grãos de trigo e seus componentes de produção. Os autores concluíram que o maior consumo de água ocorreu no início da emergência da espiga até o estágio farináceo do grão.

Por outro lado, Westgate & Peterson (1993) afirmam que a água é muito importante durante a polinização. Se ela for limitante neste período, freqüentemente, ocorre o aborto de embrião reduzindo o número total de grãos produzidos. Se o estresse ocorrer mais tarde, o aborto do embrião, geralmente, não acontece. Porém, o tamanho do grão pode ser reduzido devido ao encurtamento do período de enchimento de grãos.

Kobata et al. (1992) analisaram os efeitos conjugados do déficit de água no solo com dois níveis de umidade relativa do ar (85% e 55%) sobre a cultura do trigo. Segundo os autores, quando o solo continha água suficiente para suprir a planta, o potencial de água nas folhas não foi afetado pela mudança da umidade relativa. Entretanto, em solos com déficit de água e umidade relativa baixa, a produção de grãos foi 33% menor, comparada àquela obtida de plantas nas mesmas condições de umidade relativa, porém com suprimento adequado de água. Ainda, segundo os autores, o déficit de água afetou mais o tamanho dos grãos dos perfilhos do que os grãos do colmo principal.

2.3. Balanço de Água no Solo e Determinação da Seca Agronômica

Os vários processos que envolvem o fluxo de água no solo tais como: infiltração, redistribuição, evaporação e absorção pelas plantas, são processos interdependentes mas que, na maioria das vezes, ocorrem simultaneamente. Para estudar o ciclo da água em uma cultura é necessário considerar-se o balanço hídrico.

Caracteriza-se o balanço hídrico como sendo o somatório das quantidades de água que entram e saem num determinado volume de solo, num dado intervalo de tempo. O resultado é a quantidade líquida da água que nele permanece. Do ponto de vista agronômico, o balanço de água no solo é fundamental, pois ele estabelece as condições hídricas sob as quais uma cultura irá se desenvolver. Considerando o caso ideal, o fluxo da água no solo é representado pela seguinte expressão:

$$P + I \pm D_s - ET \pm D \pm \Delta M = 0 \quad (2)$$

onde: P é a precipitação natural (mm), I é a água proveniente de irrigação (mm), D_s é o escoamento superficial, ET é a água evaporada e transpirada pelas plantas, D é a drenagem em profundidade e ΔM é a água armazenada no perfil do solo.

Na prática, os termos que mais interessam da Eq. (2) são ET e ΔM . Pelo cálculo de ET, pode-se ter uma idéia de quanto o solo perdeu de água por evapotranspiração num dado período de tempo. Discussões mais detalhadas sobre esse tipo de balanço hídrico podem ser encontradas em Tubelis & Nascimento (1980) e Ometto (1981).

De acordo com Braga (1982), nos últimos tempos muitos métodos têm sido desenvolvidos para a determinação da umidade do solo, podendo ser agrupados em duas categorias: aqueles destinados às medidas de tensão de umidade e os destinados às medidas do conteúdo de água. No primeiro grupo são incluídos os métodos elétricos e os tensiômetros. No segundo, o método de secagem em estufa (gravimétrico) e o método de dispersão de neutros (sonda de neutros). Entretanto, nenhum dos métodos disponíveis é satisfatório para a rotina de campo, usada pelo

agricultor, por serem dispendiosos e consumirem muito tempo de operação e interpretação dos resultados obtidos.

O desenvolvimento da técnica do balanço hídrico, como um método alternativo de se estimar a umidade do solo, apresenta a vantagem em relação aos demais métodos, pelo baixo custo dos equipamentos envolvidos, simplicidade de medidas e razoável precisão dos resultados obtidos (Braga, 1982).

No Brasil, os primeiros estudos de balanço hídrico foram feitos no estado de São Paulo (Camargo, 1964). Posteriormente, Ranzani (1972) incluiu no balanço hídrico variáveis inerentes ao solo na capacidade de armazenamento.

Braga (1982) desenvolveu uma metodologia para determinar o balanço de água no solo e a caracterização da seca agrônômica, denominado de Balanço Hídrico Modificado (BHM), que leva em conta não apenas o teor de umidade no solo, mas também o conceito de água livremente disponível ou água disponível efetiva (ADE), em função da demanda atmosférica e da espécie de cultura agrícola.

O conceito de seca agrônômica, adotado por Braga (1982), refere-se à condição onde há uma disponibilidade insuficiente de água na zona das raízes, para promover um ótimo crescimento da planta, ou seja, quando toda água disponível efetiva (ADE) for consumida, a evapotranspiração real ou atual (E_{Tr}) torna-se menor que a evapotranspiração potencial (E_{Tp}), impondo condições de estresse hídrico para a planta. Desta forma, pelo balanço hídrico modificado, toda vez que os limites de umidade do solo atingirem valores menores do que o armazenamento crítico (AC), caracteriza-se como um dia “seco”. Braga (1982) caracteriza o armazenamento crítico como aquela quantidade de água, abaixo da qual $E_{Tr} < E_{Tp}$.

2.4. Considerações sobre a Radiação Solar

Assim como a água é importante para a vida vegetal, a radiação solar é outra componente muito importante no sistema de produção agrícola, por ser a fonte de energia para a produção de matéria seca.

O sol é considerado como sendo um corpo negro que emite radiação e, de acordo com a lei de Wien, o comprimento de onda em que ele emite máxima radiação é inversamente proporcional à sua temperatura conforme expressa a seguinte relação (Gardner et al., 1985):

$$\lambda_{\text{max}} = 2,88 \times 10^6 \lambda / T \tag{3}$$

onde, $2,88 \cdot 10^6 \lambda$ é a constante de Wien, T é a temperatura absoluta (K).

Considerando que a temperatura do sol seja de 5750 K e substituindo na Eq. (3), tem-se que λ_{max} corresponde a 500 nm (região do verde), ou seja, o espectro da irradiância solar é máximo no comprimento de onda de 500 nm (Figura 1).

Figura 1 - Curva de irradiância solar

Fonte: Slater (1980)

O fluxo total de energia solar no topo da atmosfera é de $\cong 1400 \text{ W m}^{-2}$, o que equivale a $2,0 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$, (Szeicz, 1974; Gardner et al.; 1985). Entretanto, essa quantidade de energia ao atravessar a atmosfera sofre atenuações, por causa da reflexão, espalhamento e da absorção de constituintes atmosféricos tais como: vapor d'água, partículas dispersas, conteúdo de ozônio, nuvens, etc. Isto, causa uma redução na quantidade de energia para valores entre $1,4$ e $1,7 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Pelo conceito ondulatório de propagação da radiação eletromagnética, o fluxo radiante que chega à superfície terrestre possui um espectro contínuo entre $0,3 \mu\text{m}$ a $3,2 \mu\text{m}$ (Figura 1). Segundo Gardner et al. (1985), 44% a 50% dessa energia concentra-se na faixa do visível que vai de $0,4$ a $0,7 \mu\text{m}$, a qual é perceptível pelo olho humano e, por coincidência, é a radiação absorvida pelos pigmentos da planta para realizar a fotossíntese. O gráfico contido na Figura 2, denominado espectro eletromagnético, contém de forma organizada o conjunto dos diferentes tipos de energia radiante expresso em frequência (F) e em comprimento de onda (CO).

O fluxo radiante ao atingir a superfície do dossel vegetativo interage com o mesmo resultando num fracionamento da seguinte maneira: a) parte do fluxo é refletido, b) outra parte do fluxo é absorvido pelos elementos do dossel vegetativo e c) outra parte do fluxo é transmitido. A quantidade relativa de cada uma destas partes, depende da superfície e varia com o comprimento de onda (Jackson & Huete, 1991). Esse fracionamento pode ser expresso de acordo com a seguinte equação do balanço de energia:

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \quad (4)$$

onde, ϕ_i , ϕ_r , ϕ_a e ϕ_t são os fluxos de energia radiante incidente, refletido, absorvido e transmitido, respectivamente.

Normalizando a Eq. (4) em relação ao fluxo incidente (ϕ_i), tem-se:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \quad (5)$$

onde: as razões adimensionais ρ , α e τ são denominadas de reflectância, absorptância e transmitância, respectivamente, cujos valores definem as propriedades radiométricas dos alvos analisados.

Figura 2 - O Espectro eletromagnético.

Fonte : Steffen (1995)

Em se tratando de vegetação, a parte refletida, que pode ser medida por sensores, resulta da interação da radiação solar com as diversas camadas ou estratos da vegetação e do solo sobre o qual ela se desenvolveu (Bauer, 1975). Entretanto, Vane & Goetz (1988), comentam que para entender as interações da radiação solar com a vegetação é fundamental o entendimento das propriedades ópticas da folha, por ser o principal componente da vegetação que interage com a radiação solar.

2.5 - Propriedade Óptica da Folha

Dois domínios espectrais são considerados nos estudos da propriedades ópticas das folhas: região do visível e do infravermelho.

2.5.1 - Região do visível do espectro eletromagnético

Nos estudos relacionados à fotossíntese a faixa da radiação solar na região do visível é denominada de radiação fotossinteticamente ativa e, no inglês, de

“Photosynthetically Active Radiation” (PAR). Nesta faixa espectral, tanto a reflectância quanto a transmitância das folhas são menores do que 15%. A reflectância apresenta um pico em 530 nm (Bauer, 1975). A maior parte da PAR que incide sobre o dossel vegetativo é absorvida pelos pigmentos fotossintetizantes no mesófilo das folhas. A maior parte dos pigmentos são compostos pelas clorofilas *a* e *b* e, em menor quantidade, os carotenóides, as xantofilas e as antocianinas. No mesófilo a energia é espalhada em virtude das interações da radiação, nos espaços intercelulares, com as paredes celulares hidratadas, originando múltiplas reflexões e refrações, propiciando, assim, uma melhor absorção da radiação pelos pigmentos (Knipling, 1970). Em função das características dos diferentes pigmentos a absorção da PAR é mais acentuada nos comprimentos de ondas de 480 nm (clorofila *b*) e 680 nm (clorofila *a*), passando por uma absorção muito baixa entre 540 a 620 nm (Figura 3).

Figura 3 - Espectro de absorção para três pigmentos fotossintetizantes: clorofila *a*, clorofila *b* e β -caroteno.

Fonte: Darnell et al. (1990), p. 622.

2.5.2 - Região do infravermelho do espectro eletromagnético

A região do infravermelho é constituída da radiação solar, cujo comprimento de onda situa-se na faixa espectral entre 700 nm a 1 mm.

Didaticamente, esta região é dividida em três partes a saber: a) infravermelho próximo (700 a 1300 nm), b) infravermelho médio (1300 a 2500 nm) e c) infravermelho distante (2500 nm a 1 mm).

Na região do infravermelho próximo, as propriedades ópticas da folha são dominadas, principalmente, pelas estruturas celulares internas. Muito embora, haja uma contribuição indireta do conteúdo de água da folha, nessa região espectral, a absorção é muito baixa (menos de 15 %) e a reflectância pode chegar até 50 %, dependendo da estrutura anatômica das folhas (Tucker & Garratt, 1977).

É importante salientar que na região do infravermelho próximo, a quantidade de radiação refletida por várias camadas de folhas é bem maior do que a refletida por uma única folha. Isto ocorre devido a um fenômeno, denominado por Knipling (1970), de fator de compensação e por Hoffer (1978), de reflectância aditiva. Este efeito foi demonstrado na prática por Myers (1970), estudando a reflectância de folhas de algodão nas faixas do visível e infravermelho próximo (Figura 4).

Figura 4 - Reflectância de folhas de algodão superpostas até uma camada de seis folhas.

Fonte: Myers (1970), p. 255.

2.5.3 - Fatores que afetam as propriedades ópticas da folha

2.5.3.1 - Estrutura anatômica

De acordo com Guyot (1990), a reflectância no infravermelho próximo é, geralmente, afetada pela estrutura anatômica das folhas. Depende dos estratos celulares, do tamanho das células e da espessura do mesófilo esponjoso. Assim, as folhas de dicotiledôneas possuem reflectância maior do que as de monocotiledôneas, para uma mesma espessura, porque as primeiras têm um mesófilo esponjoso mais desenvolvido.

2.5.3.2 - Idade

As propriedades ópticas de uma folha mudam significativamente ao longo do ciclo de desenvolvimento e crescimento da planta, ou seja, durante a fase juvenil a folha apresenta uma reflectância conforme é mostrado na Figura 5. Quando a folha atinge o estágio de maturação, ela apresenta um decréscimo da reflectância na região do visível e um aumento na região do infravermelho próximo (Bauer, 1975). Este efeito está associado ao maior número de espaços aéreos intercelulares no mesófilo das folhas maduras (Gausman et al., 1978).

Figura 5 - Principais características da resposta espectral de uma folha verde.

Fonte: Hoffer, (1978)

Knipling (1967), citado por Bauer (1975), afirma que folhas senescentes produzem efeito oposto ao de folhas maduras, ou seja, a reflectância no visível decresce. Entretanto, Guyot (1990), contradiz às afirmações de Knipling (1967), citado por Bauer (1975), ao mostrar que, em folhas senescentes a reflectância apresenta uma relação linear positiva até 1300 nm (Figura 6).

As mudanças ocorridas na curva de reflectância da folha senescente, contida na Figura 7, podem ser explicadas ao nível de pigmentos fotossintetizantes. De acordo com Taiz & Zeiger (1991), no início da senescência, ocorre o amarelecimento da folha em consequência da degradação das clorofilas *a* e *b*. Ocorrendo a degradação das clorofilas há menor absorção da radiação solar e, consequentemente, a resposta espectral na região do visível aumenta. Finalmente, nos estádios mais avançados da senescência ocorre também a degradação dos carotenos, levando à morte das células, acarretando com isso, um desarranjo das estruturas internas da folha, aumentando os espaços aéreos intercelulares. Com o aumento dos espaços aéreos, aumenta a reflectância no infravermelho próximo. Com a morte das células há uma diminuição do conteúdo de água nas folhas, alterando assim a reflectância na região do infravermelho médio.

Figura 6 - Curvas de reflectância espectral de folhas de plantas obtidas durante a fase de crescimento vegetativo (folhas verdes) e durante a senescência.
Fonte: Guyot (1990), p. 27.

2.5.3.3 - Nutrientes

A deficiência de nutrientes na planta, em geral, é provocada pela pobreza do solo em elementos essenciais requeridos para um bom desenvolvimento da mesma. Entretanto, quando há excesso de água em solos com boa drenagem, alguns elementos (por exemplo o nitrogênio) podem ser arrastados para as camadas mais profundas do perfil do solo, fora do sistema radicular, induzindo uma deficiência nutricional à planta para aqueles elementos.

Por outro lado, uma das funções da água no sistema solo/planta é servir de meio de transporte de nutrientes do solo para a planta através da absorção do soluto (água mais nutrientes) pelas raízes. Se há déficit de água no solo, a absorção do soluto é reduzida, conseqüentemente, a planta poderá sofrer uma deficiência nutricional, mesmo estando disponível os elementos essenciais no solo.

Em termos de propriedades ópticas das folhas, a deficiência de nutrientes é outro fator que afeta de forma significativa. Al-Abbas et al. (1974) compararam as características espectrais de folhas saudáveis de milho com folhas deficientes em nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, magnésio e cálcio e concluíram que a deficiência desses nutrientes causou uma redução na concentração de clorofila e na absorção da radiação nos comprimentos de onda de 530 e 640 nm. Uma explicação em termos bioquímicos, para a redução na concentração de clorofila e na mudança do comportamento espectral, é que esses elementos ou fazem parte da estrutura da clorofila, como é o caso do nitrogênio e magnésio ou participam na síntese de enzimas e/ou transporte de energia durante a fotossíntese (Horler et al., 1980 e 1983).

Por outro lado, em plantas cujas folhas apresentam deficiência em fósforo e cálcio, a absorção da energia, na região do infravermelho próximo, é menor do que a de folhas sem deficiência. Porém, em folhas deficientes em enxofre, magnésio, potássio e nitrogênio a absorção é maior do que em folhas normais (Bauer, 1975).

2.5.3.4 - Conteúdo de água

A influência da água na reflectância da folha, em comprimentos de ondas abaixo de 1300 nm, tem recebido pouca atenção (Bowman, 1989; Hunt & Rock, 1989; Carter, 1991). A absorção da radiação solar é pouco pronunciada entre 700 nm a 1300 nm e, menos ainda, entre 400 nm a 700 nm. Carter (1991) denomina isto de efeito de secundário, porque não pode ser explicado somente pela propriedade absorptiva da água e devem ser incluídas influências de outras componentes das folhas como os pigmentos. Bauer et al. (1980) e Ripple (1986) atribuem o efeito secundário do conteúdo de água nas folhas às variações na concentração de clorofila e desarranjo nas estruturas internas da folha. Segundo os autores, a redução do conteúdo de clorofila nas folhas propicia uma menor absorção de energia na região do visível, consequentemente, aumentando a reflectância nesta faixa espectral. Por outro lado, na região do infravermelho próximo, a reflectância aumenta em consequência de mudanças nas estruturas internas da folha. Segundo ainda os autores, as mudanças na reflectância não são substanciais enquanto o turgor das folhas apresentar um conteúdo de água superior a 75%. Afirmarções semelhantes são encontradas em Horler et al. (1983). A Figura 7, ilustra curvas da reflectância espectral, obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdos de água.

Figura 7 - Curvas da reflectância espectral obtidas em folhas de milho com diferentes conteúdos de água

Fonte: Hoffer (1978) p. 239

2.6. Dossel Vegetativo

Tudo aquilo que compõe a parte aérea de uma comunidade de plantas e que, portanto, está envolvido diretamente com as interações da energia solar é definido por Assunção (1989), como dossel vegetativo ou simplesmente dossel. Um dossel é caracterizado pelos seus componentes, sua organização e sua estrutura.

As folhas são as constituintes do dossel que têm maior importância no processo de interação da radiação solar com a vegetação, pois é nelas que se realiza quase toda a fotossíntese, responsável pela conversão da energia solar em energia química para a produção de carboidratos. Tanto a arquitetura da folha quanto da planta está adaptada para um melhor aproveitamento da radiação solar no processo da fotossíntese. Como a folha é o principal elemento de captação da radiação solar, observa-se uma predominância da área foliar quando comparada à área de outros componentes da planta. Esta predominância é tão marcante que normalmente outros órgãos que também podem realizar fotossíntese, são desprezados em estudos sobre produção de fotoassimilados.

As culturas agrícolas, bem como qualquer vegetação, apresentam, ao longo de seus ciclos de desenvolvimento, variadas condições de dosséis.

Em se tratando de comportamento espectral, ou seja, da reflectância das culturas, durante a fase de desenvolvimento da vegetação, o dossel é considerado incompleto, pois apresenta uma mistura de resposta espectral da parte aérea da planta e do solo onde a cultura foi implantada. À medida em que a vegetação ou a cultura atinge o seu desenvolvimento máximo, o dossel é definido como sendo completo, correspondendo a uma cobertura vegetal de 100%. Entretanto, os dosséis de certas culturas tais como: citrus e café, por exemplo, apresentam dosséis incompletos mesmo em condições de máximo desenvolvimento, pois a contribuição do solo na reflectância desses dosséis é muito grande, devido ao espaçamento entre plantas.

2.7 . Interações da Radiação Solar com Dosséis Agrícolas

A interação da radiação solar com dosséis agrícolas se dá, principalmente, através dos pigmentos contidos nas folhas. Logo, tudo aquilo que foi discutido sobre as propriedades ópticas da folha é válido, até certo ponto, para dossel de vegetação, uma vez que a folha é o principal componente do mesmo. Entretanto, conforme afirma Bauer (1975), nos estudos das características espectrais de dosséis agrícolas deve-se ter em mente que, além dos princípios que regem as propriedades ópticas das folhas, há também a influência do solo de fundo, que pode ser significativo dependendo do estágio de desenvolvimento e do tipo de cultura.

Reichardson et al. (1975) e Kollenkark et al. (1982) comentam que os dosséis de culturas agrícolas exibem, no campo de visada do sensor, quatro componentes com diferentes propriedades de reflectância óptica: a) vegetação iluminada, b) solo iluminado, c) vegetação sombreada e d) solo sombreado. A magnitude de cada uma destas componentes varia com a cobertura vegetal, orientação e espaçamento das fileiras, morfologia do dossel, estrutura interna dos elementos que compõem o dossel, diâmetro da copa da planta, altura da planta, teor de água na planta e no solo, condição fitossanitária, ângulo zenital e azimutal do sol, latitude e tamanho do elemento de resolução do equipamento utilizado (Kollenkark et al., 1982).

Em cultura de trigo com 70% de cobertura vegetal, Jackson et al. (1979b), estudando as influências do ângulo zenital e orientação das fileiras de plantio, no comportamento espectral da cultura, comentam que no decorrer do dia os alinhamentos norte-sul apresentaram variações na reflectância de até 230%, na faixa espectral correspondente ao vermelho.

Kollenkark et al. (1982), trabalhando com a cultura de soja, plantada em nove diferentes orientações de fileiras, obtiveram grandes variações na reflectância na região do vermelho (até 140%), para as parcelas com orientação norte-sul, quando a cobertura do solo foi de 64%.

Na região do infravermelho próximo, o sombreamento não é tão pronunciado como na região do visível, devido ao múltiplo espalhamento e a baixa

absorção por pigmentos nesta faixa do espectro (Colwell, 1974; Daughtry et al., 1982).

A morfologia das folhas que compõem o dossel vegetativo exerce forte influência na reflectância. Pinter Jr. et al. (1985), mediram a reflectância em dosséis e em folhas isoladas de diferentes cultivares de trigo, que tinham a mesma fitomassa e índice de área foliar verde. Os autores verificaram que, independentemente do cultivar, não houve diferença na reflectância, quando medida em folhas isoladas. Entretanto, para essas mesmas cultivares as reflectâncias foram diferentes quando medidas sobre os diferentes dosséis.

Com relação à estrutura interna dos elementos do dossel, o mesófilo de folhas de gramíneas apresenta, como regra, ausência de diferenciação entre parênquima paliádico e esponjoso (mesófilo compacto). No entanto, abaixo das duas camadas epidérmicas há fileiras de células que apresentam organizações mais regulares do que as do restante do mesófilo. Elas possuem esclerênquima bastante desenvolvido e, comumente, apresentam fibras em placa longitudinal que se estende dos feixes vasculares maiores em direção à epiderme. Gausman & Allen (1973), estudando o mesófilo de plantas cultivadas, observaram que as menores reflectâncias no comprimento de onda de 1000 nm foram obtidas, em dosséis, cujo mesófilo das folhas era compacto, concordando com a natureza da reflectância do infravermelho próximo, descrita por Knipling (1970). Entretanto, nos estudos de Gausman & Allen (1973), sobre medidas de reflectância em dosséis de trigo, cana-de-açúcar e milho, os autores comentam que o dossel do trigo, apresentou-se como uma exceção, mostrando uma reflectância comparável à reflectância de folhas dorsiventrais. Examinando a microfotografia do corte transversal de folhas de cana-de-açúcar, trigo e milho, verificaram que o mesófilo do trigo é bem mais poroso do que o da cana-de-açúcar e do milho.

A reflectância de dosséis agrícolas, nas regiões do visível e infravermelho próximo, é indiretamente afetada pelo turgor celular (Myers, 1970). Quando uma cultura sofre um estresse de água (reduzindo seu turgor celular), as mudanças iniciais da reflectância são mais pronunciadas na região do visível do que no infravermelho próximo, devido à sensibilidade da clorofila a distúrbios

fisiológicos. Porém, a detecção das condições de estresse se baseia, não na mudança da reflectância de folhas individuais, mas na redução da área foliar total exposta ao sensor, por perda direta de folhas, mudança de sua orientação, ou ainda da supressão do crescimento da planta. Nesses casos, a reflectância do infravermelho próximo tende a ser reduzida relativamente mais do que a do visível, por causa da redução do realce do infravermelho próximo ou por aumento da exposição do solo (Knippling, 1970).

Hoffer & Johannsen (1969), ao estudarem a resposta espectral em dosséis de milho, cujas folhas apresentaram diferentes teores de água, comentam que o decréscimo da umidade não causou diferença significativa na resposta espectral em dosséis, cuja umidade das folhas encontrava-se acima de 54%. Abaixo deste nível de umidade, o aumento na reflectância foi substancial em todos os comprimentos de onda observados.

Ripple (1986) comenta que as relações entre o teor de água na folha e a reflectância nas regiões do visível e do infravermelho próximo não são diretas. Geralmente, em plantas sob estresse hídrico ocorre uma diminuição na concentração de clorofila provocando um desarranjo nas estruturas internas. Com isto, folhas sob estresse hídrico têm maior reflectância no vermelho (menor absorção) e no infravermelho próximo.

Segundo Guyot (1990), a maioria dos resultados que descreve este fenômeno foram obtidos em condições de laboratório. Nas condições de campo, Thomas et al. (1971) e Guyot et al. (1985) observaram que é necessário ocorrer um estresse de água extremamente severo, para afetar as propriedades ópticas das folhas. Além disso, o estresse de água, dificilmente, é detectado quando somente as propriedades ópticas das folhas são medidas nas regiões do visível e do infravermelho próximo.

Além da reflectância descrita, segundo os mecanismos comentados anteriormente, Vanderbilt & Grant (1983) definem uma outra forma de reflectância chamada de reflectância especular, que se origina na cutícula das folhas. A cutícula das folhas é estratificada e, freqüentemente, apresenta estruturas cerosas. Nas folhas de trigo ocorrem estruturas aciculares irregulares distribuídas sobre uma superfície

cerosa plana. Dependendo da geometria de aquisição dos dados espectrais, a reflectância especular pode ser significativa. Neste caso, a reflectância observada não corresponde somente à interação da radiação com o mesófilo e resulta num erro devido à diferente composição espectral da radiação refletida de forma especular.

Nas condições de máxima absorção da energia solar, Taiz & Zeiger (1991) relatam que somente 5% da energia solar incidente sobre um dossel vegetativo é efetivamente absorvida pelos pigmentos e utilizada pelas plantas na produção de carboidrato. Isto ocorre porque a maior parte da radiação incidente (50 a 56%) possui energia que não é suficiente para alterar o estado energético dos pigmentos fotossintetizantes, portanto não é absorvida. Além disso, boa parte da energia absorvida é convertida em calor e outra parte é usada em processos de metabolismo e respiração.

2.8 - Radiometria

Deering (1989) define a radiometria ou espectrorradiometria de campo, como uma técnica de sensoriamento remoto empregada para medir a radiação solar refletida de objetos na superfície terrestre, em determinadas faixas ou bandas espectrais. Por utilizar a radiação solar como fonte de energia, ela é dita passiva.

O emprego de dados espectrais, coletados por sensores colocados em satélites orbitais, nos estudos relacionados à agricultura depende muito do conhecimento das interações da radiação eletromagnética com os dosséis agrícolas, conforme foi discutidos nos itens anteriores. Uma das maneiras de estudar estas interações, da radiação eletromagnética com dosséis agrícolas, é através de pesquisas básicas, realizadas ao nível de solo. Dentro deste objetivo, a radiometria de campo é bastante utilizada (Milton, 1987). Na agricultura, por exemplo, é possível estabelecer relações funcionais entre a resposta espectral com: índice de área foliar, produção de fitomassa e/ou grãos, entre outros (Asrar et al., 1984; Aase et al., 1984; Wiegand & Richardson, 1987; Asrar et al., 1989).

Os equipamentos empregados para medir a radiação solar refletida dos objetos são classificados em duas categorias: a) espectrorradiômetros e

espectrômetros, que registram informações da energia refletida pelos alvos numa faixa espectral de forma contínua e b) radiômetros que operam em número limitado de bandas espectrais. Formas específicas desses equipamentos, usados no estudo da reflectância no espectro visível, são referidos como espectrofotômetros e fotômetros (Milton, 1987).

Muitos termos, com significados semelhantes, têm sido empregados para descrever as técnicas de medidas da reflectância espectral nas condições de campo, como por exemplo: espectrometria de campo (Silva et al., 1971); radiometria com suporte manual (Tucker, 1978); radiometria de campo (Celis-Ceusters, 1980); radiometria de solo (Milton, 1982); reflectância espectralométrica (Gladwell et al., 1983); espectrometria de campo (Milton, 1987). Entretanto, o termo comumente empregado para esse tipo de medida é radiometria de campo.

Epiphany (1989) destaca algumas características peculiares das medidas radiométricas obtidas no campo: a) os dados são obtidos próximo à superfície com influência mínima da atmosfera; b) os espectrorradiômetros são sensores que, geralmente, possuem um número maior de bandas espectrais (alta resolução espectral) do que os sensores a bordo de satélite ou de aeronave; c) devido à proximidade alvo-sensor, pode-se controlar melhor as relações entre as medidas espectrais e os parâmetros biofísicos e d) maior facilidade para delinear experimentos em campo, além de possibilitar um maior número de medidas ao longo do ciclo da cultura. Milton (1987) destaca outras características importantes da radiometria de campo: a) estabelece um elo entre as medidas de laboratório e as medidas de campo, servindo para a calibração de sensores orbitais e aerotransportados; b) definir bandas espectrais, visada do sensor e horário de tomada de dados e c) fornecer informações básicas para o desenvolvimento, refinamento e teste de modelos.

2.8.1 - Medida da reflectância de dosséis agrícolas

A obtenção de medidas da reflectância espectral em dosséis agrícolas, nas condições de campo, é difícil porém necessário, tendo em vista que medidas em amostras de dosséis agrícolas no laboratório, na maioria das vezes, não refletem a

realidade no campo, pois não guardam a integridade das condições em que se encontram as culturas agrícolas no campo, além de que, no laboratório, as condições de iluminação podem não corresponder àquelas observadas no campo (Milton, 1987).

A radiação solar ao atingir o dossel das culturas é, em parte, refletida diretamente da superfície das folhas, conforme discutido no item 2.5; outra parte é refletida do interior dos componentes do dossel. Entretanto, dosséis agrícolas não são difusores perfeitos (superfície lambertiana). Difusor perfeito ou superfície lambertiana é aquela superfície que reflete a radiação solar igualmente em todas as direções do hemisfério, isto é, sua grandeza física é igual em qualquer direção que for medida. Não sendo superfície lambertiana, a intensidade do fluxo refletido varia com o ângulo no qual está sendo medida. Entretanto, Milton (1987) comenta que por ser pequena essa variação nos estudos das características espectrais de alvos naturais, em especial alvos agrícolas, assume-se que eles se comportam como superfície lambertiana.

Com base em Steffen (1995), serão definidos algumas grandezas radiométricas que foram empregadas nesta pesquisa a saber:

a) *Fluxo radiante* (ϕ) é a taxa na qual a energia radiante é transferida de um ponto para outro que é medido em Joule/segundo ($J s^{-1}$) ou Watt (W).

b) *Irradiância* (E) é a razão entre o fluxo radiante que incide no alvo e a área do mesmo, cuja unidade é $W m^{-2}$.

c) *Radiância* (L) expressa a razão entre o fluxo radiante refletido (ou emitido) por unidade de área e por unidade de ângulo sólido na direção considerada, cuja unidade é $W m^{-2} sr^{-1}$. Ângulo sólido descreve a convergência ou divergência angular do fluxo radiante em três dimensões, cuja unidade é o sterradiano (sr).

Utilizando os conceitos de grandeza radiométrica, a reflectância de um alvo, conforme descrito na Eq. (5), pode ser rescrita de forma simplificada pela seguinte expressão:

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i} \quad (6)$$

onde: ϕ_r e ϕ_i são os fluxos radiantes refletido e incidente respectivamente.

Pode-se deduzir da Eq. (6), que a reflectância é uma grandeza adimensional e tem valores compreendidos entre 0 e 1.

Por outro lado, a reflectância pode apresentar variações que dependem não somente da natureza da superfície (lambertiana ou não), como também da distribuição espacial e espectral dos fluxos radiantes, incidente e refletido, no hemisfério. Desta forma, uma descrição mais adequada da reflectância deve incluir a configuração geométrica (espacial) e espectral dos fluxos envolvidos (Milton, 1987; Steffen, 1995). Na Figura 8 pode-se observar que os fluxos radiantes, incidente (ϕ_i) e refletido (ϕ_r), contidos nos ângulos sólidos ω_i e ω_r , respectivamente, possibilitam definir a reflectância bicônica ou bidirecional do elemento de superfície da como sendo:

Figura 8 - Geometria da radiação no alvo para a definição da reflectância bicônica
Fonte: Steffen (1995), p.2.

$$\rho(\omega_i, \omega_r) = \frac{\phi(\omega_r)}{\phi(\omega_i)} \quad (7)$$

onde: $\rho(\omega_i, \omega_r)$ é a reflectância bicônica, $\phi(\omega_r)$ e $\phi(\omega_i)$ são os fluxos radiantes refletido e incidente por unidade de ângulo sólido (ω), respectivamente.

Considerando a distribuição espacial da radiância desses fluxos, a Eq.

(7) fica:

$$\rho(\omega_i, \omega_r) = \frac{\int_{\omega_r} L(\Theta_r, \varphi_r) \cos\Theta_r d\omega_r}{\int_{\omega_i} L(\Theta_i, \varphi_i) \cos\Theta_i d\omega_i} \quad (8)$$

Fazendo $d\Omega = \cos\Theta d\omega$ a Eq. (8) pode ser simplificada como:

$$\rho(\omega_i, \omega_r) = \frac{\int_{\omega_r} L(\Theta_r, \varphi_r) d\Omega_r}{\int_{\omega_i} L(\Theta_i, \varphi_i) d\Omega_i} \quad (9)$$

onde $d\Omega = \cos\Theta d\omega$ é o ângulo sólido projetado.

Levando em conta a distribuição espectral da reflectância a Eq. (9)

fica:

$$\rho(\omega_i, \omega_r, \lambda) = \frac{\int_{\omega_r} L(\Theta_r, \varphi_r, \lambda) d\Omega_r d\lambda}{\int_{\omega_i} L(\Theta_i, \varphi_i, \lambda) d\Omega_i d\lambda} \quad (10)$$

A reflectância espectral de dosséis agrícolas não pode ser medida diretamente, por duas razões básicas: a) é termo que expressa uma razão de duas grandezas radiométricas (radiância : irradiância) portanto não existe como grandeza física e b) até o momento não existe equipamento capaz de medir a irradiância que incide num elemento da superfície de alvos não lambertianos, por unidade de ângulo sólido. A alternativa nesse caso é expressar a reflectância em termos da radiância, que é medida pelo radiômetro. Para tal, padroniza-se a radiância da amostra com a radiância medida sobre uma superfície perfeitamente difusora (superfície lambertiana) sob as mesmas condições de iluminação (Milton, 1987 e Steffen, 1995). A radiância do alvo é, então, expressa como uma proporção da radiância da

superfície perfeitamente difusora e o resultado desta razão é denominado de fator de reflectância (FR).

Na prática, não existe uma superfície completamente difusora, a correlação é feita através da radiância medida numa placa de referência, recoberta com sulfato de bário (BaSO_4) ou óxido de magnésio (MgO) e calibrada em relação a um padrão de laboratório, cuja reflectância espectral é conhecida. Assim, a reflectância é expressa como:

$$\text{FR}(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_a(\Theta_r, \varphi_r)}{dL_p(\Theta_i, \varphi_i)} \times k(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r) \quad (11)$$

onde: $dL_a(\Theta_r, \varphi_r)$ é a radiância medida sobre a superfície do alvo, $dL_p(\Theta_i, \varphi_i)$ é a radiância medida sobre a placa de referência, nas mesmas condições de iluminação e $k(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r)$ é o fator de intercalibração entre as duas cabeças sensoras, obtido pela razão da medida da radiância na placa de referência.

$$K = \frac{L_{p1}(\lambda)}{L_{p2}(\lambda)} \quad (12)$$

onde: $L_{p1}(\lambda)$ é a radiância da placa de referência medida no sensor 1 e $L_{p2}(\lambda)$ é a radiância da placa de referência medida no sensor 2.

Para medir o fator de reflectância deve-se assumir: a) campo de visada do sensor é menor que 20° ; b) a placa de referência deve preencher o campo de visada do sensor; c) não deve haver variação na irradiação entre as medidas de dL_a e dL_p ; d) o fluxo direto da radiação domina o campo de irradiação; e) a resposta do sensor é linear com a mudança no fluxo de radiação e f) as propriedades da reflectância da placa de referência são conhecidas e não variam durante as medidas (Milton, 1987). Bauer et al. (1986) comentam que a utilização do FR permite comparar medidas radiométricas adquiridas em diferentes horas e localidades.

Para Steffen (1995), as medidas da radiância da amostra e da placa de referência devem ser realizadas dentro do menor intervalo de tempo possível para evitar flutuações significativas do fluxo de radiação solar. Para minimizar o intervalo

de tempo entre as duas medições pode-se utilizar dois radiômetros intercalibrados que são acionados simultaneamente (Jackson et al., 1987). Porém, Steffen (1995) sugere o uso de duas unidades sensoras, ligadas ao mesmo radiômetro, uma direcionada para o dossel agrícola e outra direcionada para a placa de referência.

2.9 - Índice de Vegetação

Índice de vegetação resulta de transformações lineares do fator de reflectância, obtido em duas ou mais bandas espectrais, envolvendo soma, razão, diferença ou qualquer outra combinação (Wiegand et al., 1991).

Person & Miller (1972) foram os pioneiros nos estudos de índices de vegetação. No início dos anos 70, eles realizaram estudos intensivamente para medir o fator de reflectância de gramíneas e constataram que os fatores de reflectância, obtidos nos comprimentos de onda de 680 nm e 780 nm, foram os melhores para separar vegetação verde de solo e de vegetação morta. Verificaram ainda a existência de uma correlação linear negativa, entre o fator de reflectância e a vegetação verde, no comprimento de onda de 680 nm e uma correlação linear positiva em 780 nm. A partir desses estudos, numerosos índices de vegetação foram desenvolvidos, para caracterizar parâmetros biofísicos da vegetação, tais como: índice de área foliar verde (Holben et al., 1980; Asrar et al., 1984; Hatfield et al., 1985; Clevers, 1989), fitomassa (Tucker, 1979; Green, 1987; Gallo et al., 1985; Prince, 1991), radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Wiegand et al., 1974; Asrar et al., 1984; Hatfield et al., 1984; Seller, 1985) e produtividade (Asrar et al., 1985).

Do ponto de vista matemático, a maioria dos índices de vegetação são funcionalmente equivalentes e, assim, fornecem a mesma informação (Richardson & Wiegand, 1977; Wiegand et al., 1979; Lautenschlager & Perry, 1981).

De acordo com Baret & Guyot (1991), os índices de vegetação existentes podem ser agrupados em duas grandes classes: índices na forma de razão [como exemplo, “Simple Ratio” (SR); “Normalized Difference Vegetation Index” (NDVI); “Soil Adjusted Vegetation Index” (SAVI)] e aqueles caracterizados pela

distância ortogonal [exemplo, “Perpendicular Vegetation Index” (PVI); “Weighted Difference Vegetation Index” (WDVI); “Greenness Vegetation Index” (GVI)].

O emprego de índices de vegetação, para caracterizar e quantificar um determinado parâmetro biofísico de culturas agrícolas, tem duas grandes vantagens: a) permite reduzir a dimensão das informações multiespectrais, através de um simples número, além de minimizar o impacto das condições de iluminação e visada; e b) fornece um número altamente correlacionado com parâmetros agrônômicos (Chen et al., 1986; Vygodskaya et al., 1989; Wiegand et al., 1991). Além disso, Pinter Jr. et al. (1985) comentam que a razão entre bandas, ao contrário do emprego separado dos fatores de reflectância, também controla os erros introduzidos nas estimativas da radiância pela resposta não lambertiana dos alvos agrícolas.

A maioria dos índices de vegetação são obtidos de medidas do fator de reflectância, sobre dosséis de vegetação, nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo (Huete & Jackson, 1988). Segundo Baret et al. (1989), há duas razões básicas para o uso destas faixas espectrais; a) estão presentes em quase todos os satélites de sensoriamento remoto e b) contêm mais de 90% da informação espectral da vegetação.

Tucker (1979) trabalhou com dois grupos de nove índices de vegetação. Um grupo gerado com medidas da reflectância nas faixas espectrais do verde e do vermelho e outro, gerado com reflectância obtida nas faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo. De acordo com os resultados obtidos, o autor comenta que o segundo grupo foi o que apresentou melhores correlações com os parâmetros biofísicos: biomassa seca, biomassa úmida, clorofila total, entre outros.

Segundo Choudhury (1987), os dois índices de vegetação mais comumente usados para a estimativa da APAR são: razão simples (RS) e o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), os quais são definidos pela seguintes expressões:

$$RS = \frac{IVP}{V} \quad (13)$$

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (14)$$

onde: IVP é o fator de reflectância medida na faixa espectral do infravermelho próximo, V é o fator de reflectância medida na faixa espectral do vermelho.

Do ponto de vista matemático, esses dois índices apresentam equivalência funcionais, ou seja, contêm o mesmo tipo de informações sobre parâmetros biofísicos das culturas (Jackson & Huete, 1991). Entretanto, conforme comentam os autores, o NDVI é mais sensível a vegetação esparsa do que o RS.

Huete & Jackson (1987) comentam que a maioria das pesquisas, envolvendo índices de vegetação, tem sido conduzidas em ecossistemas bem vegetados. Por essa razão, eles apresentam resultados bastante satisfatórios. Entretanto, Colwell (1974) verificou que o índice de vegetação razão simples (RS) não apresentou bom desempenho para estimar parâmetros biofísicos de dosséis de gramíneas, com cobertura vegetal menor do que 30%. Tucker (1977) e Ripple (1985) investigando as características assintóticas da reflectância de duas espécies de gramíneas, verificaram que o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI) foi o melhor índice para estimar baixa quantidade de fitomassa. Resultados semelhantes foram encontrados por Wanjura & Hatfield (1987) na estimativa do índice de área foliar e fitomassa em algodão, soja, sorgo e girassol.

A maioria dos trabalhos envolvendo índices de vegetação para estimativa de parâmetros agronômicos foram realizados em região de clima temperado. Entretanto, na região de clima subtropical Rudorff & Batista (1990) empregaram índices de vegetação, obtidos a partir de medidas espectrais do trigo, no estudo de parâmetros agronômicos.

Utilizando simulações das bandas TM₁ a TM₅ mais TM₇ do Landsat, obtidas de medidas radiométricas, em culturas agrícolas no norte paulista, Formággio (1989) concluiu que as maiores informações sobre as culturas estudadas (trigo e feijão) foram obtidas nas bandas simuladas TM₃ e TM₄, que correspondem às medidas radiométricas nas faixas do vermelho e infravermelho próximo. Por isso,

afirma o autor que as informações espectrais contidas nessas duas bandas são suficientes para monitorar essas culturas.

Como os índices de vegetação são obtidos a partir de medidas do fator de reflectância, eles estão sujeitos à influência dos mesmos fatores que atuam nas propriedades ópticas dos elementos do dossel agrícola. Baret & Guyot (1991) citam como fatores intrínsecos ao dossel as propriedades ópticas da folha, a geometria do dossel e a influência do solo e, como fatores externos, posição do sol e nebulosidade.

2.10. Radiação Fotossinteticamente Ativa Interceptada e Absorvida pelo Dossel Vegetativo

Entre os fatores ambientais que influenciam o crescimento das plantas terrestres, a radiação solar tem um relevante destaque por ser a única fonte de energia para o processo fotossintético (Asrar et al., 1992). Além do processo fotossintético, as plantas também utilizam a energia solar convertida em energia química (fotoassimilados) na respiração e na conversão de fotoassimilados em matéria seca (Daughtry et al., 1983).

A soma algébrica da PAR que é absorvida pelo dossel da vegetação, é denominada de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR). A quantidade que é interceptada pelo dossel denomina-se radiação fotossinteticamente ativa interceptada (IPAR).

Vários estudos têm demonstrado que a produção de matéria seca, de um grande número de culturas agrícolas, é proporcional à PAR absorvida pelos elementos fotossintetizantes do dossel vegetativo (Gallagher & Biscoe, 1978; Steven et al., 1983; Prince, 1991) ou através da IPAR (Daughtry et al., 1983; Gosse et al., 1986; Green, 1987).

Goward & Huemmrich (1992) comentam que há uma ambigüidade entre pesquisadores com relação à APAR e IPAR. Segundo eles, esta confusão em terminologia pode levar a diferentes conclusões e resultados conflitantes, no que diz respeito à avaliação da APAR, por técnicas de sensoriamento remoto. Em muitos estudos, por exemplo, Kumar & Monteith (1982) empregaram somente dois sensores, um acima e outro abaixo do dossel, para estimar a IPAR. Esta abordagem

de medida não registra a radiação refletida e superestima a radiação absorvida pelo dossel da cultura. Além do que, não registra a radiação refletida pelo solo. Entretanto, Daughtry et al. (1992) mostraram que a diferença entre IPAR e APAR, quando obtidas sobre as culturas de milho e soja, foi inferior a 3,5%. Porém, segundo ainda estes autores, quando estas diferenças são integradas no tempo pode levar a um valor considerável. Por esta razão, deve-se ter muito cuidado em comparar resultados de APAR e IPAR relatados por diferentes pesquisadores.

No tocante à APAR, resultados de várias pesquisas mostram que, em plantas saudáveis e adequadamente supridas com água e nutrientes, existe uma relação linear positiva entre a produção de fitomassa e/ou grãos e a quantidade da PAR absorvida pelo dossel ao longo do ciclo da cultura (Gallo et al., 1985; Green, 1987; Wiegand & Richardson, 1990; Prince, 1991; entre outros). Neste contexto, tem sido empregado alguns modelos matemáticos para estimar a APAR (Kumar & Monteith, 1981; Steven et al., 1983; Asrar et al., 1984 e 1985; Tucker et al., 1985; Choudhury, 1987; Goward & Huemmrich, 1992; Rudorff et al., 1996).

Basicamente existem duas linhas de pesquisas, na área do sensoriamento remoto, no que diz respeito à estimativa da APAR. Na primeira, a APAR é medida através de equipamentos que registram somente a radiação solar na faixa espectral entre 400 nm e 700 nm (Hipps, 1983; Gallo et al., 1985; Daughtry et al., 1992; Goward & Huemmrich, 1992). Na segunda, a APAR é estimada através de índices de vegetação, obtidos de medidas do fator de reflectância nas bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo (Asrar et al., 1984-85; Choudhury, 1987; Baret et al., 1989; Leblon et al., 1991; Price, 1992; Goward & Huemmrich, 1992).

No tocante à primeira linha de pesquisa, Hipps (1983) comenta que é necessário fazer quatro medidas da radiação, independente do fluxo radiante. Essas medidas são realizadas duas acima e duas abaixo do dossel da cultura, assim definidas:

(i) medidas acima do dossel:

a) densidade de fluxo incidente PAR (I_o);

b) densidade de fluxo refletido PAR proveniente do dossel e do solo (I_r).

(ii) medidas abaixo do dossel:

- a) densidade de fluxo transmitido através do dossel até a base da cultura (I_t);
- b) densidade do fluxo refletido pelo solo (I_s).

Feitas estas medidas, a APAR é determinada pela seguinte relação:

$$APAR = \sum (I_o + I_s) - (I_t + I_r), \quad W \, m^{-2} \quad (15)$$

Em se tratando de grandes áreas agrícolas percebe-se que a abordagem acima é impraticável, pois tornaria o processo muito oneroso e demorado. Talvez, seja este o motivo que forçou a busca da segunda alternativa, ou seja, estimar a APAR através de índices de vegetação, obtidos de medidas do fator de reflectância nas faixas espectral do vermelho (V) e infravermelho próximo (IVP), além do que, como mencionado anteriormente, a maioria dos satélites de recursos naturais dispõe de sensores que registram a reflectância nestas duas bandas espectrais.

Kumar & Monteith (1981) e Asrar et. al. (1984) mostraram, através de estudos teóricos, a existência de uma correlação entre o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI) e a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel agrícola (IPAR). Essa correlação foi observada na prática para vários dosséis agrícolas (Kumar & Monteith, 1982; Daughtry et al., 1983; Hatfield et al., 1984; Gallo et al., 1985) e em pastagem (Asrar et al., 1986).

Shultis (1991) estudando a sensibilidade de vários índices de vegetação, na estimativa da APAR e do índice de área foliar (IAF), comenta que o NDVI foi o menos sensível aos efeitos do ângulo de elevação solar, razão da radiação direta e difusa, orientação das folhas (normal, planófilas, erectrófilas), na estimativa da APAR do que quando foi utilizado na estimativa do IAF.

É importante salientar que o NDVI é utilizado para estimar a fração da PAR (f_A) que é absorvida pelo dossel da cultura. Posteriormente, a APAR é obtida multiplicando f_A pela PAR incidente durante o dia todo. Além disso, como o NDVI é obtido de medidas radiométricas tomadas de modo instantâneo (fração de tempo de 1/60s), ele estima a fração f_A da APAR diária, a partir de uma medida instantânea.

Logo, é de se esperar que o valor da APAR, obtido através do NDVI seja diferente daquele quando a APAR é medida durante o dia todo. Entretanto, Daughtry et al. (1992) demonstraram que existe uma relação linear entre a APAR diária, medida o dia todo, e a APAR estimada através do NDVI, obtido próximo ao meio dia solar, para a cultura da soja. Neste estudo eles obtiveram a seguinte relação:

$$APAR_m = 1,0074 APAR_e, \quad R^2 = 0,999 \quad (16)$$

onde: $APAR_m$ é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida medida o dia todo e, $APAR_e$ é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida estimada através do NDVI com medidas do fator de reflectância feitas ao meio dia solar.

Asrar et al. (1984) estimaram a fração da PAR absorvida (f_A) pelo dossel de trigo, através do NDVI e estabeleceram a seguinte relação empírica:

$$f_A = -0,109 + 1,253 NDVI, \quad (17)$$

$$R^2 = 0,965$$

A APAR acumulada é obtida pelo somatório da APAR diária, geralmente, até a maturidade fisiológica da cultura e expressa pela seguinte expressão:

$$APAR_{ac} = \sum f_A PAR, \quad MJ \, m^{-2} \, d^{-1} \quad (18)$$

onde: $f_A PAR = APAR$ e o subscrito ac denota acumulada.

2.11. Eficiência do Uso da Radiação

A eficiência do uso da radiação ou eficiência fotoquímica (ϵ), é a razão da matéria seca produzida por unidade de energia PAR absorvida e usada na sua produção, ou seja, a eficiência do uso da radiação expressa quanto de matéria

seca é produzida por unidade de energia PAR absorvida, cuja unidade é g MJ^{-1} (Gallo et al., 1993).

A eficiência fotossintética do aproveitamento da energia solar não é a mesma para todos os dosséis de plantas. A maneira utilizada para medir esta eficiência é através da determinação da produção de fitomassa total ou ainda, de produtos úteis. De modo geral, esta eficiência para as culturas agrícolas é baixa, não atingindo 1%. Em condições ótimas registram-se eficiências de 3 a 4%, para as plantas C_3 e de 5 a 6% para as C_4 (Machado, 1985). Por essa razão, é importante conhecer o valor de ε para cada tipo de cultura e sua variação em relação aos fatores ambientais, culturais e de manejo, pois ela é uma das variáveis de muitos modelos de crescimento e produção de culturas agrícolas, que levam em consideração a radiação incidente total (S), a PAR incidente, a fração PAR absorvida ou interceptada pelo dossel (f_A) e a eficiência do uso da radiação (ε) num intervalo de tempo (T). Monteith (1972), mostrou que a relação entre a produção de fitomassa seca total e a PAR absorvida pelo dossel de plantas pode ser escrita como:

$$M = \varepsilon \int f_A \cdot P \cdot S \cdot dt \quad (19)$$

onde: M é fitomassa seca total produzida, geralmente considerada acima do solo (g m^{-2}), ε é a eficiência do uso da radiação ou eficiência fotoquímica (g MJ^{-1}); f_A é a fração PAR absorvida, em MJ m^{-2} , P é energia PAR do espectro eletromagnético e S é a radiação solar total incidente, em MJ m^{-2} .

Isolando ε na Eq. (19) tem-se:

$$\varepsilon = \frac{M}{\int f_A \cdot P \cdot S \cdot dt} \quad \text{onde, } \int f_A \cdot P \cdot S \cdot dt = \text{APAR} \quad (20)$$

Prince (1991) reuniu informações de ε para várias culturas agrícolas e concluiu que as diferenças observadas entre os valores de ε , para uma mesma cultura, foram devidas à inconsistência entre investigadores nos métodos de medir a fitomassa e a radiação. Este mesmo fato foi relatado, posteriormente, por Gallo et al. (1993).

Mesmo em áreas agrícolas homogêneas, o erro na estimativa da fitomassa, por processo amostral, geralmente, excede a 10%, devido à heterogeneidade entre plantas (Daughtry & Hollinger, 1984). Por isso, em áreas agrícolas extensas, deve-se ter muito cuidado na amostragem da área para estimar a fitomassa da cultura. Por exemplo, Daughtry (1990) comenta que para estimar a fitomassa em campos de milho (homogêneos) foram necessárias amostras de no mínimo 21 plantas, para detectar uma diferença de 10% na produção de fitomassa entre diferentes campos de milho, com $p = 0,05$.

Com respeito à medida da radiação, Gallo et al. (1993) relatam que a estimativa da fração PAR absorvida após a maturidade fisiológica superestima a APAR e, conseqüentemente, altera o valor de ϵ . Asrar et al. (1984) comentam que em cultura de trigo, após a maturidade fisiológica, a PAR incidente foi, em grande parte, absorvida por elementos senescentes do dossel, que não contribuíram em nada para o acúmulo de matéria seca, causando uma diminuição no valor de ϵ . Ainda segundo Asrar et al. (1984), a eficiência do uso da radiação difere pouco entre os estádios vegetativo e reprodutivo. Porém, muitas vezes, ϵ é calculada para uma estação inteira do crescimento da cultura. Os autores comentam, também, que devido aos erros na determinação da fitomassa, a estimativa de ϵ , com base em informações radiométricas obtidas em pequenos períodos, durante o ciclo da cultura, pode ser bastante variável.

Por outro lado, Sinclair & Horie (1989) comentam que as variações nos valores de ϵ podem ainda ser conseqüência de outros fatores tais como: diferença nos estádios de desenvolvimento da cultura entre experimentos, erros na amostragem de plantas para determinar a fitomassa, calibração dos sensores, variação da adubação nitrogenada, conteúdo de clorofila nas folhas. Além disso, ϵ pode ser afetada por fatores climáticos como déficit de saturação do ar (Stockle & Kiniry, 1990) e temperatura do ar (Muchow et al., 1990).

Para um mesmo local, ϵ é relativamente constante para muitas práticas de manejo. Nestas diferentes condições, há redução tanto da APAR quanto da fotossíntese e, conseqüentemente, no crescimento da planta (Wiegand et al., 1991).

Gallo et al. (1993), trabalhando com a cultura do milho, demonstraram que do plantio até o pendoamento a estimativa direta da APAR, embora tendo valor maior do que quando estimada através do IAF ou de índices de vegetação, não resultou em diferença significativa ($p \leq 0,1$) nos valores de ϵ , porém diferiram após isto.

A eficiência na conversão da APAR em matéria seca pode ser limitada por estresses tais como: temperatura, água, nutrientes e poluentes atmosféricos (Asrar et al., 1984; Unsworth et al., 1984; Demetriades-Shah et al., 1992; Rudorff et al., 1996).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

3.1.1. Local

O experimento foi conduzido sob condições de campo, numa área experimental de irrigação do Departamento de Engenharia Rural na Fazenda Areão, pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) em Piracicaba, SP. A área situa-se a uma altitude de 580 m, cujas coordenadas aproximadas são 22° 42'30''S e 47° 38'00'' WGr. O experimento foi instalado em uma área contínua de 33m x 22m, com declive de 8%.

3.1.2. Clima

O clima da região, segundo a classificação Koppen é do tipo mesotérmico Cwa, ou seja, subtropical úmido com estiagem no inverno, com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e a do mês mais quente superior a 22°C. Este clima foi também denominado por Camargo et al. (1974) de tropical de altitude. Posteriormente, Ometto (1989) fez um estudo temporal, envolvendo variáveis climáticas e de radiação solar para o município de Piracicaba, desde quando se implantou a estação meteorológica na ESALQ/USP. Os resultados de algumas dessas variáveis, analisadas por Ometto (1989), estão contidos na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados médios de: precipitação, radiação global, umidade relativa, temperatura máxima, insolação e evaporação do tanque classe “A” (E.C.A).

Mês do Ano	Radiação Global (a)	Precipitação (b)	Umidade Relativa(c)	Temperatura máxima (d)	Velocidade do vento U ₂ (e)	E.C.A.(f)
	W. m ⁻²	(mm)	(%)	°C	(m s ⁻¹)	mm d ⁻¹
Junho	49,5	317	77	24,6	1,8	2,1
Julho	29,9	346	77	24,8	2,1	2,3
Agosto	29,8	402	68	26,5	2,3	3,2
Setembro	58,2	421	63	27,6	2,5	4,1

Período de observação

- (a) e (b) - de 1926 a 1988
(c) ; (e) e (f) - de 1943 a 1988
(d) - de 1917 a 1988

3.1.3. Solo

O solo no qual foi instalado o experimento foi descrito e classificado por Ranzani et al. (1966) como Terra Roxa Estruturada série “Luiz de Queiroz” o que vem a ser na classificação americana (U.S.D.A., 1975), um Paleudalf oxic, cujo material de origem são rochas básicas.

Recentemente, Sparovek et al. (1993), num trabalho de avaliação das terras do campus da ESALQ, classificaram o solo, onde foi instalado o experimento, como sendo uma Terra Roxa Estruturada eutrófica, o que leva a ser na classificação americana, um Kandiudalfic Eutrudox.

Para caracterização química do solo foram extraídas, durante a execução do experimento, amostras nas profundidades de 15 cm e 20 cm. A análise química foi feita no laboratório de rotina do setor de Nutrição Mineral de Plantas do Departamento de Química da ESALQ/USP que consistiu da determinação dos teores dos macronutrientes, matéria orgânica, hidrogênio mais alumínio (H + Al), soma de bases trocáveis (S), capacidade de troca de cátions (T) e índice de saturação por bases (V%), conforme pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Características químicas do solo da área de estudo nas profundidades de 15 e 20 cm para fósforo, matéria orgânica, potencial hidrogeniônico, potássio, cálcio, magnésio, alumínio + hidrogênio, alumínio, soma de base, capacidade de troca de cátions e índice de saturação por base.

Prof. (cm)	P(*) µg cm ⁻³	M.O. (%)	pH	meq 100 cm ⁻³							V (%)
				K	Ca	Mg	H + Al	Al ⁺⁺⁺	S	T	
15	1,00 mb	1,75 b	5,40a	0,09b	3,30a	0,87a	3,25 b	0,09b	4,30a	7,50a	56,7a
20	2,80 mb	1,90 b	5,05a	0,14b	3,37a	1,07a	4,23 a	0,17b	4,60a	8,80a	52,0a

obs.: mb = muito baixo , b = baixo, a = alto

Interpretação segundo o Departamento de Química da ESALQ/USP

(*) extraído pelo método da resina

Com relação à caracterização física do solo foram retiradas amostras indeformadas somente na profundidade de 20 cm. Com estas amostras foram feitas as seguintes determinações: a) densidade do solo pelo método do anel volumétrico, utilizando cilindro de alumínio de UHLAND, com 344,77 cm³; b) análise granulométrica pelo método de Bouyoucos, e classificação textural segundo Lemos & Santos (1982), conforme consta na Tabela 3 e; c) curva de retenção de água do solo determinada por secamento das amostras indeformadas submetidas às tensões de 0, - 1, -2, -5, -10, -30, -50, -100, -500 e -1500 kPa, utilizando para tal, a placa porosa e a membrana de pressão (Tabela 4).

Tabela 3- Características físicas do solo na profundidade de 20 cm

Densidade (g/cm ³)	Granulometria (%)			Classe textura
	Areia	Silte	Argila	
1,5	18,9	21,4	59,7	argiloso

Tabela 4 - Umidade volumétrica nas diversas tensões na profundidade de 20 cm.

	Potencial matricial ($-\psi_m$, kPa)									
	0	-1	-2	-5	-10	-30 *	-50	-100	-500	-1500
umidade ($\theta, \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0,554	0,500	0,479	0,452	0,420	0,389	0,368	0,349	0,320	0,301

* considerou-se como sendo a tensão na capacidade de campo (CC)

3.2. Delineamento Experimental

O delineamento experimental consistiu-se de um experimento em blocos ao acaso, com 5 tratamentos e 3 repetições. Cada unidade experimental tinha a dimensão de 4,0 m x 2,5 m cada.

Os tratamentos consistiram da testemunha e da suspensão da água em quatro fases distintas, durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, ou seja: a) suspensão da água do início do crescimento até o completo emborrachamento; b) suspensão da água do emborrachamento até o início da floração; c) suspensão da água da floração até o enchimento do grão e d) do enchimento do grão até a maturação, conforme é mostrado na Tabela 5.

A caracterização de cada estágio de desenvolvimento da cultura foi feita com base na escala Feekes & Large (1954), citado em Scheeren (1986), conforme consta no apêndice A.

Tabela 5 - Período de tempo em que cada tratamento foi submetido à suspensão da água e os estádios fenológicos na escala Feekes e Large (Scheeren, 1986)

Tratamento	Duração (dias)	Período (dias)	Estádio de Desenvolvimento Feekes e Large
Testemunha	92	163 a 251	irrigada em todo ciclo
Perfilhamento	29	167 a 201	2 a 7
Emborrachamento	31	201 a 222	8 a 10.5
Enchimento grãos	17	219 a 235	10.5.1 a 11.2
Maturação	17	235 a 252	11.2 a 11.4

Para evitar o deflúvio superficial da água de irrigação ou de precipitação para o interior das parcelas em regime de estresse hídrico, respeitou-se uma distância mínima entre parcelas e blocos de 5 metros (Figura 9). Além disso, para evitar que as parcelas sob estresse de água fossem molhadas pelas chuvas, elas foram protegidas por um sistema de cobertura construído da seguinte maneira: a) nas laterais de cada parcela foram fixadas seis peças de madeira com dimensões de 180 cm x 10 cm x 3 cm. Essas peças foram enterradas a 50 cm de profundidade no solo; b) sobre essas peças foram fixadas ripas, em forma convexa, com dimensões de 3 cm x 2 cm, de tal forma que a armação final tomou o formato de uma pequena casa de vegetação (Figura 10); c) Em caso de chuvas, uma lona plástica de 10 m x 8 m foi colocada sobre estas armações de madeiras e fixadas em estacas enterradas no solo (Figura 11).

Figura 9 - Esquema do delineamento experimental: disposição dos blocos e das parcelas dentro da área de estudo.

Na ausência de chuvas as lonas plásticas permaneceram enroladas ao lado das parcelas deixando, com isto, o ar movimentar livremente sobre as mesmas, evitando, assim, um aquecimento indesejável. Todavia, até mesmo quando as parcelas foram cobertas, devido à ocorrência de chuvas, teve-se o cuidado de fixar as lonas a 30 cm acima do solo para que houvesse livre movimentação do ar nas parcelas.

Figura 10 - Armação de madeira para proteção da água de chuva sobre as parcelas sem irrigação.

Figura 11 - Parcela sem irrigação coberta com a lona plástica para proteção de águas de chuvas

3.3. Variedade de Trigo

Neste experimento foi utilizado o cultivar de trigo IAC-287 'YACO', originário de uma linhagem selecionada no Instituto Agronômico de Campinas, proveniente do híbrido (Heima/Cocoraque 75) / Nacozare 76, que foi introduzido do Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo (CIMMYT) no México. O cultivar IAC-287 apresenta as seguintes características: altura das plantas de 0,8 - 0,9 m; resistência ao acamamento; ciclo precoce de 115-120 dias após a emergência até maturação; hábito vegetativo ereto; aurícula com presença de antocianina (violácea); posição da folha intermediária; espiga de cor creme, aristada e fusiforme, semidensa, com comprimento aproximado de 10,5 cm e; grão de coloração creme. Este cultivar apresenta tolerância à toxicidade de ferro e de manganês e suscetibilidade à toxicidade de alumínio.

3.4. Preparo do Solo e Semeadura

O preparo do solo consistiu de uma subsolagem, uma aradura e uma gradagem. O arado subsolador foi regulado para garantir uma subsolagem de 50 cm de profundidade.

Após o preparo do solo, procedeu-se a demarcação e a identificação das parcelas experimentais no terreno. Em seguida foram abertos sulcos de drenagem de aproximadamente 0,20 m de profundidade ao redor de cada parcela. Os sulcos foram interligados, entre as parcelas, no sentido do maior declive do terreno, para o escoamento superficial das águas de chuva e de irrigação a fim de evitar que a cultura do trigo fosse molhada, nas parcelas sob estresse hídrico.

O plantio foi efetuado manualmente obedecendo o espaçamento entre linhas de 0,17 m com uma densidade de 70 a 80 sementes por metro linear, o que garantiu uma população aproximada de 440 plantas por metro quadrado.

Para homogeneizar a densidade de plantas dentro do sulco, as sementes foram distribuídas ao longo de uma régua de madeira, com o mesmo

comprimento do sulco, distanciadas entre si em intervalo $\cong 1,4$ cm. Após esse procedimento, as sementes foram, então, colocadas nos sulcos de plantio e cobertas com uma camada de terra de aproximadamente 5 cm de espessura.

De acordo com as recomendações da Coordenadoria de Assistência Técnica Integral - CATI (1994). Boletim 216, dispensa-se a calagem do solo, para o plantio do trigo, toda vez que este acusar um $V\% \geq 50\%$. Por este motivo, não foi realizada aplicação de calcário uma vez que nas profundidades de 15 e 20 cm o $V\%$ foi de 56,7 e 52 %, respectivamente (Tabela 2).

A adubação de plantio foi feita com base na análise de terra e segundo as recomendações da CATI (1994), Boletim 216. Aplicou-se no plantio 20 kg de nitrogênio (N), 90 kg de fósforo (P_2O_5) e 30 kg de potássio (K_2O) por hectare, utilizando-se a mistura de adubos na fórmula 4-14-8. Após 30 dias da emergência fez-se uma adubação de cobertura na razão de 40 kg de N por hectare, na forma de nitrato de amônio.

3.5. Manejo da Irrigação

A aplicação de água nas parcelas foi realizada por irrigação por aspersão. Após a semeadura foram feitas três irrigações de aproximadamente 15 mm por m^2 , afim de garantir a germinação das sementes. A partir do momento em que as plântulas apresentaram três folhas, iniciou-se os tratamentos, ou seja, três parcelas testemunhas foram irrigadas sempre que necessário para manter a evapotranspiração real igual a evapotranspiração máxima. Nos demais tratamentos a irrigação foi feita de maneira seletiva, isto é, enquanto um tratamento estava sem receber água os demais tratamentos foram irrigados para manter a $E_{Tr} = E_{Tm}$. Terminado o período de suspensão de água num dado tratamento, reiniciava-se a irrigação nestas parcelas e, concomitantemente, iniciava-se a suspensão da água em outro tratamento. Procedeu-se desta forma para os 4 tratamentos submetidos ao estresse hídrico.

Do ponto de vista de manejo de água em sistemas irrigados, um dos aspectos fundamentais é a definição do momento de aplicação das irrigações e qual

lâmina de água a ser aplicada na lavoura. Existem várias metodologias e critérios para se estabelecer programas de irrigação, que vão desde um simples turno de rega a complexos esquemas de integração do sistema solo/água/planta/atmosfera. Neste experimento, adotou-se o manejo de irrigação recomendado pela CATI (1994), Boletim 216, o qual se baseia na evaporação do tanque classe “A” (E.C.A.) e num coeficiente “K”, que varia de acordo com o estágio de desenvolvimento da cultura, conforme indicado na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes (K) para estimar a evapotranspiração do trigo irrigado a partir da evaporação da água no tanque classe “A”, em função do estágio de desenvolvimento da cultura. *

Estádio de desenvolvimento (**)	Período médio de duração (dias)	Coeficiente (K)
0 a 2 emergência ao início do		
afilhamento	0 a 10	0,32 - 0,40
3 afilhamento	11 a 24	0,40 - 0,76
4 a 10 início da elongação ao final		
do emborrachamento	25 a 47	0,76 - 0,93
10.1a 10.5.4. início do espigamento	48 a 63	0,93 - 0,98
ao final do florescimento		
11.1 enchimento de grãos	64 a 98	0,98 - 0,72
11.12. grãos em massa ou início		
da maturação	99 a 115	0,72 - 0,52

* Fonte: CATI (1994). p.29 (Boletim 216)

** Extraído da Escala de Feekes ilustrada por Large (Scheeren,1986), apêndice 2.

Os valores de K são obtidos através da seguinte equação:

$$K = K_c \times K_p \quad (21)$$

onde: K_c é o coeficiente da cultura (varia em função do estágio de desenvolvimento da cultura) e K_p é o coeficiente do tanque classe A (varia em função da superfície de fundo).

A lâmina de água aplicada na área em cada turno de rega foi calculada segundo a equação:

$$\text{Lâmina líquida (mm)} = (K \times \text{E.C.A.} / 0,8) \cdot 100 \quad (22)$$

onde: K é o coeficiente obtido pela Eq. (21), cujos valores estão contidos na Tabela 6; E.C.A. é a evaporação do tanque classe “A” e 0,8 corresponde à eficiência da distribuição de água pela irrigação de 80%.

3.6. Balanço de Água no Solo e Caracterização dos dias “Secos”

Suspender o fornecimento de água não implica, necessariamente, submeter a planta ao estresse hídrico, haja visto que a reserva de água no solo pode suprir a planta até que a evapotranspiração real (ET_r) seja menor ou igual a evapotranspiração máxima (ET_m). Desta forma, o cálculo do balanço de água no solo e a definição dos dias em que a ET_r < ET_m, ou seja, dias “secos”, foi utilizado para estabelecer o período em que a cultura estava sob estresse hídrico. Para tal, utilizou-se o método do Balanço Hídrico Modificado (BHM), desenvolvido por Braga (1982), por ser uma metodologia que, segundo o autor, pode ser aplicada também para grandes regiões. Além disso, o método requer pouco investimento em equipamentos e, aparentemente, fornece boa precisão.

O método do BHM consiste de uma contabilização do armazenamento da água no solo, através da diferença entre o valor de entrada de água (precipitação e/ou irrigação) e o valor de saída de água (evapotranspiração) a partir da água disponível total (ADT) inicial no solo a uma determinada profundidade, calculada utilizando a Eq. (1).

À semelhança de Braga (1982) e Folegatti (1988), no cálculo do balanço de água no solo, pelo método do BHM, utilizou-se o termo água livremente disponível ou água disponível efetiva (ADE), a fim de caracterizar a quantidade de água prontamente disponível às plantas. Em outras palavras, a quantidade de água no solo onde as plantas não sofrem nenhuma restrição para o seu desenvolvimento normal. A seguinte expressão matemática foi empregada para o cálculo da ADE:

$$ADE = P \times ADT \quad (23)$$

onde: P é a parte fracional da ADT prontamente disponível e depende da demanda atmosférica (Evapotranspiração máxima -ETm) e do tipo de cultura (Kc).

O fator P, por outro lado, pode ser também definido como a fração da ADE, na qual a condição de evapotranspiração real (ETr) mantém-se igual a evapotranspiração potencial ou máxima (ETm).

Quanto à resistência ao estresse hídrico, Doorembos & Kassam (1979), classificam a cultura do trigo como pertencente ao grupo 3, indicando que esta cultura é relativamente resistente ao estresse por falta de água. Assim, o valor de P foi determinado em função da ETm média, calculada em cada período ou tratamento ao qual a cultura ficou sem irrigação, utilizando a seguinte equação:

$$P = 0,9695 \text{ EXP } (- 0,1184 \text{ ETm}) \quad (24)$$

$$(R^2 = 0,992)$$

Substituindo o valor de P na Eq. (23) determinou-se a água disponível efetiva (ADE). O próximo passo foi caracterizar, dentro do período em que a cultura ficou sem irrigação, a seca agrônômica, ou seja, os dias “secos”. A partir do momento em que o armazenamento de água no solo for abaixo do valor da água disponível efetiva (ADE), isto é, $\Delta M < ADE$, caracteriza-se o primeiro dia “seco”, ou seja, depois de consumida toda ADE, a ETr torna-se menor do que a ETm, impondo condições de estresse hídrico à planta. O limite que define a água remanescente no solo, onde $ETr < ETm$, é denominado de armazenamento crítico (AC), e é definido por Braga (1982) e Folegatti (1988), como:

$$AC = (1 - P) \times ADT \quad (25)$$

Os valores de AC foram determinados pela Eq. (25) para o período em que a irrigação ficou suspensa em cada tratamento.

No BHM o secamento ou diminuição da água no solo segue um modelo retilíneo até o armazenamento crítico (AC). Abaixo deste limite, assume-se que a diminuição da água no perfil do solo apresenta uma queda exponencial igual à adotada por Thornthwaite & Mather (1955). Assim, o armazenamento total da água, dentro de uma determinada camada de solo que contém 90 % do sistema radicular, é estimado na parte retilínea e denominado de armazenamento 1 $[ARM_{(1)}]$ e, na parte exponencial, é chamado de armazenamento 2 $[ARM_{(2)}]$. O armazenamento de água no solo referente à parte retilínea $ARM_{(1)}$ e à parte exponencial $ARM_{(2)}$ foi obtido pelas seguintes equações:

a) Para $ARM_{(1)} \geq (1 - P) \times ADT$ (parte retilínea)

$$ARM_{(1)} = ADT - N \quad (26)$$

onde: N é o valor do negativo acumulado (mm), ou seja, o somatório da diferença negativa entre a precipitação (Pr) e/ou irrigação (I) com a evapotranspiração máxima (ETm)

b) Para $ARM_{(2)} \leq AC + (1 - P) \times ADT$ (parte exponencial)

$$ARM_{(2)} = ADT \times \text{EXP} (b \cdot N_T) \quad (27)$$

onde: N_T corresponde ao negativo acumulado e utilizado na equação original exponencial de Thornthwaite & Mather (1955); b é o coeficiente angular, o qual varia em função da ADT, o qual foi estimado pela seguinte expressão:

$$b = - 0,07685 + 0,001337 \text{ ADT} \quad (28)$$

$$(r^2 = 0,97)$$

No limite correspondente ao armazenamento crítico (AC), tem-se que o $ARM_{(1)} = ARM_{(2)}$, ou seja:

$$ADT - N = ADT \times \text{EXP} (b \times N_T) \quad (29)$$

A partir do armazenamento crítico (AC) o valor do negativo acumulado (N_T), da Eq. (27) tem um somatório maior, quando comparado com o valor N da Eq. (26), porque na equação original de Thornthwaite & Mather (1955), considera-se que a diminuição da água disponível no solo é mais lenta, quando comparado com o $ARM_{(1)}$ (retilíneo), até o AC. Assim tem-se:

$$N_T = N + D \quad (30)$$

onde: D é a diferença entre o negativo acumulado no $ARM_{(1)}$ e no $ARM_{(2)}$.

Isolando da Eq. (30) a variável N_T e sabendo-se que no AC o negativo acumulado N é igual a $P \times ADT$, temos:

$$N_T = \frac{\ln [(ADT - N)/ADT]}{b} \quad (31)$$

ou

$$N_T = \frac{\ln [(ADT - P) / ADT]}{b} = \frac{\ln (1-P)}{b} \quad (32)$$

Pela Eq. (30) sabe-se que: $D = N_T - N$ e no AC, $N = P \times ADT$ Logo, $D = N_T - P \times ADT$ e como N_T é definido pela Eq. (32), o valor de D no ponto crítico fica assim definido:

$$D = \frac{\ln (1 - P)}{b} - P \times ADT \quad (33)$$

Assim:

$$N_T = N + D = N + \frac{\ln(1 - P)}{b} - P \times ADT \quad (34)$$

Substituindo (34) em (27) vem:

$$ARM_{(2)} = ADT \times EXP \left\{ b \left[N + \frac{\ln(1 - P)}{b} - P \times ADT \right] \right\} \quad (35)$$

No cálculo do balanço de água no solo, pelo método do BHM, utiliza-se uma tabela, conforme empregado por Thornthwaite & Mather (1955). Nesta tabela estão caracterizados os dias correspondentes a cada período de total ausência de água, além de mais 11 colunas onde:

- a) na coluna 1, contém informações de precipitação e/ou irrigação (Pr/I), em mm;
- b) na coluna 2, os valores dos coeficientes de cultura (Kc), os quais variam de acordo com o estágio fenológico da cultura.
- c) na coluna 3 são inseridos valores de ETm média diária, em mm;
- d) na coluna 4, inserem-se as informações das diferenças entre as colunas 1 e 3, (Pr/I - ETm);
- e) a coluna 5 contém os valores de P, estimados segundo a Eq. (24);
- f) na coluna 6 colocam-se os valores da água disponível efetiva (ADE);
- g) a coluna 7 serve para computar informações do armazenamento crítico (AC), obtidas pelo emprego da Eq. (25);
- h) na coluna 8 é inserido o somatório do negativo acumulado (N);
- i) as colunas 9 e 10 referem-se às informações do armazenamento, isto é, os valores da água armazenada e a sua alteração, em mm e
- j) na coluna 11 são inseridos os valores da evapotranspiração real (ETr) diária, em mm. d⁻¹.

Para a estimativa da evapotranspiração máxima média diária (ETm) da cultura do trigo utilizou-se dados de evaporação, obtidos através do evaporímetro

tanque classe “A” segundo recomendação da FAO (Doorenbos & Kassan, 1979). A ET_m foi calculada pela seguinte equação:

$$ET_m = K_p \times K_c \times E.C.A. \quad (\text{mm d}^{-1}) \quad (36)$$

onde: K_p varia em função da umidade relativa do ar, da velocidade do vento e da localização do tanque, isto é, se sobre grama ou solo exposto; K_c é o coeficiente de cultura e E.C.A. é a evaporação do tanque classe “A”.

A variação diária da água armazenada no solo, após o início de cada tratamento, foi obtida utilizando as Eqs. (26) e (35), ou seja, para valores de $N \leq P.ADT$, utilizou-se a Eq. (26), correspondente a variação da água de forma retilínea, pelo BHM. Caso contrário, isto é, $N > P.ADT$, empregou-se a Eq. (35), correspondente a variação da água da parte exponencial do BHM (Braga, 1982). A partir do momento em que $N > P.ADT$, tem-se o primeiro dia “seco”. No caso P foi determinado de acordo com a Eq. (24).

Os fatores climáticos que mais influenciam a perda de água no solo através da evapotranspiração são: temperatura alta, baixa umidade relativa e velocidade do vento a dois metros de altura (U_2). Para obter os valores de cada uma dessas variáveis climáticas, durante o período de tempo anterior e posterior ao primeiro dia “seco” em cada tratamento, utilizou-se informações coletadas na estação meteorológica da ESALQ/USP, no período de tempo em que o experimento permaneceu no campo.

3.7. Medidas Radiométricas sobre o Dossel da Cultura do Trigo

Para obter as medidas radiométricas do dossel da cultura do trigo foi utilizado o espectrorradiômetro portátil, SPECTRON SE-590, especialmente projetado para medidas em campo. Este equipamento é fabricado pela Spectron Engineering Incorporation, Denver, Colorado, EUA.

O SPECTRON SE-590 consiste de duas unidades básicas: uma controladora (data logger/CE 500) e outra detetora (SE-390WB), ligada à unidade controladora por meio de cabos de conexão. Para operar em condições de campo, o sistema utiliza como fonte de energia uma bateria de 12 Vdc.

A unidade detetora (SE-390WB), também denominada de cabeça sensora, pode ser ajustada para diversos campos de visada ("field of view"; FOV) através de lentes com diferentes ângulos (1° , 6° , 15° ou 180°). Utilizando uma rede de difração, como elemento dispersivo da radiação incidente sobre uma matriz de fotodiodo, a unidade detetora é capaz de registrar, numa fração de tempo que varia de 1/60 até 64/60s, informações sobre as características radiométricas do alvo em 256 bandas de aproximadamente 2,7 nm cada, na faixa espectral de 400 nm a 1100 nm do espectro eletromagnético.

A unidade controladora (CE-500) contém um microprocessador que permite programar o sistema, através de um teclado multinível, para a aquisição de espectros simples (uma única medida da radiância espectral do alvo), médios (média de várias medidas da radiância espectral do alvo) ou sequenciais (medidas da radiância espectral em intervalos pré definidos), bem como, introduzir indicadores tais como data, hora e número de identificação nos dados adquiridos. Possui ainda um gravador digital (12 bit), que permite gravação e leitura dos dados em uma fita cassete do tipo miniatura. A unidade controladora é também utilizada na formatação e na transferência dos espectros para periféricos de saída como: osciloscópio, traçador gráfico e impressora matricial. Uma via serial RS-232C permite a transferência dos dados adquiridos pelo espectrorradiômetro para um computador onde podem ser analisados através de um programa computacional específico.

No presente trabalho foram utilizadas duas unidades detetoras, ligadas a unidade controladora por cabos de conexão. Nesta configuração pode-se registrar dois espectros de forma quase simultânea. Um dos espectros corresponde à radiância de uma amostra de área sobre o dossel da cultura (alvo) e outro corresponde à radiância da placa de referência (sulfato de bário; BaSO_4). As medidas da radiância quase que simultâneas, do alvo e da placa, foram utilizadas para obter o fator de reflectância bidirecional espectral (FRBE) ou simplesmente fator de reflectância

(FR), de acordo com Milton (1987). As unidades detetoras foram montadas num mastro de alumínio a uma altura aproximada de 3 metros acima do dossel da cultura (Steffen, 1995). À medida que a cultura foi crescendo o mastro foi sendo expandido para manter a altura aproximada de 3 metros acima do dossel (Rudorff & Batista, 1990).

As unidades foram montadas com seus eixos ópticos orientados de forma paralela sendo uma posicionada para o dossel da cultura, utilizando-se o campo de visada de 15° , o que abrangeu uma área no terreno aproximada de 50 cm de diâmetro e, para a outra unidade, utilizou-se o campo de visada de 1° , posicionada sobre a placa de referência fixada a 15 cm abaixo da unidade detetora, conforme é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Esquema de obtenção de medida da radiância (alvo-referência) para a aquisição do fator de reflectância do trigo em condições de campo.
Fonte: Steffen (1995)

Ao longo do ciclo da cultura procurou-se obter medidas radiométricas, diariamente no período da manhã, preferencialmente, com início em torno de 9:30 h, desde que as condições meteorológicas fossem favoráveis, ou seja, condições de céu aberto para que se tivesse o máximo da radiação solar direta incidente e o mínimo de radiação solar difusa, proveniente do céu e da presença de nuvens.

Em cada campanha radiométrica foi adotado o seguinte procedimento:

a) prévio ao início de uma sequência de medidas da radiância do dossel do trigo das 15 parcelas, foi obtido um par de medidas da radiância da placa de referência com as duas unidades detetoras, para ser utilizado na intercalibração, durante o tratamento dos dados no computador; b) em seguida, o mastro era posicionado ao lado das parcelas de tal forma que as medidas da radiância do dossel do trigo fossem obtidas em três locais diferentes, dentro da parcela, intercaladas com as medidas da placa de referência. Essas medidas foram sempre tomadas nos mesmos locais e de maneira semelhante, ou seja, um par de medidas tomado na direção frontal ao operador e, os outros dois pares, girando o mastro para a direita e para a esquerda do operador. A Figura 13, ilustra a tomada de dados radiométricos sobre uma parcela de trigo.

Figura 13 - Tomada de dados radiométricos sobre uma parcela de trigo.

Após a realização de cada campanha radiométrica, que consistiu na medição das 15 parcelas (3 amostras por parcela) os dados gravados em fita cassete foram transferidos para um microcomputador através da interface serial RS-232C, utilizando-se o programa “Espectro” (Steffen, 1996). Este programa foi desenvolvido no Laboratório de Radiometria (LARAD) do INPE, com o objetivo de transferir e

tratar os dados coletados pelo espectrorradiômetro (SPECTRON SE-590). O programa também permite a geração de arquivos em formato ASCII para tratamento dos dados em outros aplicativos para análise estatística ou geração de gráficos.

3.7.1 - Cálculo do fator de reflectância

Após a transferência dos dados para o computador, o passo seguinte foi calcular o fator de reflectância (FR) de cada ponto amostral, utilizando o programa *espectro*, empregando o seguinte procedimento:

- 1) Calibração dos dados. Consistiu em dividir a medida da radiância obtida sobre o dossel do trigo pela medida da radiância da placa de referência, obtendo assim, o fator de reflectância (FR), empregando-se a Eq. (11) descrita no item 2.8.
- 2) Fator de reflectância médio. Os três pares de medidas da radiância, obtidos em cada parcela, tiveram como objetivo adquirir uma informação espectral mais representativa do dossel da cultura. Desta forma, através da média desses três pares de medidas obteve-se uma única curva espectral do fator de reflectância entre 400 a 1100 nm.
- 3) Intercalibração. A intercalibração teve como objetivo corrigir as diferenças de sensibilidade de resposta entre as duas unidades detetoras utilizadas. Para tal, dividiu-se o fator de reflectância (FR) pelo resultado obtido na Eq. (16).
- 4) Ajuste do ângulo de elevação solar. Devido à inconsistência nos horários em que as medidas radiométricas foram realizadas foi feita uma correção ajustando os valores do NDVI para o meio dia solar local. Com base no valor do ângulo zenital no horário da medida:

$$FR_{(SL)} = \frac{FR \times \cos \theta_i}{\cos \theta_{sl}} \quad (37)$$

onde: $FR_{(SL)}$ é o fator de reflectância ao meio dia local; θ_i é o ângulo zenital no horário da medida e: θ_{sl} é o ângulo zenital ao meio dia local.

5) Simulação das bandas TM_3 e TM_4 do Landsat. A partir do FR médio de cada parcela, obteve-se os valores do FR relativos às duas bandas do sensor TM do Landsat (TM_3 , 630-690 nm; TM_4 , 760-900 nm).

3.8. Estimativa da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida

A fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (f_A) pelo dossel da cultura do trigo foi estimada com base nos valores do NDVI, através da equação empírica proposta por Asrar et al. (1984):

$$f_A = -0,109 + 1,253 \text{ NDVI} \quad (38)$$

onde; f_A é a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida

Os valores do NDVI não disponíveis, devido às condições meteorológicas desfavoráveis para a realização das medidas radiométricas, foram obtidos através da interpolação linear entre duas medidas (anterior e posterior) ao dia em que não se realizou a campanha radiométrica.

A APAR diária, isto é, a quantidade da PAR absorvida pelo dossel da cultura do trigo para cada dia foi obtida através da seguinte equação:

$$\text{APAR} = f_A \times \text{PAR} \quad (39)$$

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) incidente em Piracicaba, durante o período do experimento (junho a setembro) foi estimada em função da radiação global (R_g) incidente e da razão de insolação (n/N), coletadas na estação meteorológica do Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, situada próximo a área onde foi instalado o experimento. As estimativas da PAR diária, em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, foram obtidas segundo as equações de regressão propostas por Assunção (1994):

$$a) PAR = 0,417 R_g, \text{ para dias em que } n/N \leq 0,1 \quad (R^2 = 0,99) \quad (40)$$

$$b) PAR = 0,429 R_g, \text{ para dias em que } 0,1 \leq n/N \leq 0,9 \quad (R^2 = 0,965) \quad (41)$$

$$c) PAR = 0,496 R_g, \text{ para dias em que } n/N \geq 0,9 \quad (R^2 = 0,99) \quad (42)$$

Como os dados da radiação global utilizados foram expressos, parte em $\text{cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e parte em $\text{W m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e, como o cálculo da APAR é expresso em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Asrar et al., 1984), houve a necessidade de transformá-los em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Para expressar os valores da APAR em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ foi utilizado o procedimento contido no apêndice B.

Uma vez determinada a PAR, segundo as equações 40, 41 e 42, obteve-se a APAR diária empregando a Eq. (39) e APAR acumulada (AAPAR) foi obtida pelo somatório da APAR diária desde a germinação até a maturidade fisiológica.

3.9. Cálculo da Eficiência do Uso da Radiação

A eficiência do uso da radiação ou eficiência fotoquímica (ϵ) é resultante do quociente entre a matéria seca (fitomassa ou grão) pela APAR acumulada (AAPAR) da emergência até a maturidade fisiológica da cultura, cuja unidade é g MJ^{-1} . No presente trabalho (ϵ) foi calculado tanto para fitomassa (ϵ_F) quanto para grão (ϵ_G), ou seja:

$$\epsilon_F = \text{fitomassa seca acima do solo} / \text{APAR acumulada} \quad (43)$$

e

$$\epsilon_G = \text{grão seco} / \text{APAR acumulada} \quad (44)$$

3.10. Índice de Área Foliar

As medidas do índice de área foliar (IAF) foram realizadas de maneira não destrutiva, utilizando o medidor LAI-2000 “Plant Canopy Analyzer” da LI-COR, Inc. Lincoln, Nebraska, EUA. O equipamento consiste de: a) uma unidade de controle (LAI-2070), que permite medir, computar e gravar o resultado numa memória disponível de 64K. Os dados podem ser transferidos para o computador, através de uma interface serial RS-232; b) uma unidade sensora (LAI-2050), que coleta a radiação solar difusa que chega acima e abaixo do dossel da cultura, em cinco diferentes ângulos simultaneamente, estimando o IAF através da atenuação da radiação nestes diferentes ângulos. Sobre a lente desta unidade pode ser colocada uma capa que direciona ou restringe a entrada da radiação evitando interferências indesejáveis nas medidas, como por exemplo, a presença do próprio operador do instrumento. Como este equipamento utiliza-se a radiação difusa que chega acima e abaixo do dossel da cultura, as medidas foram sempre realizadas próximo ao por do sol.

Para estimar o IAF as medidas da radiação difusa, acima e abaixo do dossel do trigo, foram tomadas nas mesmas posições dentro das parcelas em três locais diferentes e duas vezes por semana (segunda e sábado), desde o estágio de alongamento vegetativo, a partir de 26 dias após a emergência, até o estágio de enchimento de grãos (27/08/1995).

3.11. Coleta de Dados Agronômicos

Para o cálculo da eficiência do uso da radiação, conforme as Eqs. (43) e (44), bastaria ter coletado a produção final de fitomassa e de grãos. Entretanto, fez-se também a análise do efeito do estresse hídrico sobre outros componentes de produção tais como: a) altura média da planta; b) número de espigas por metro quadrado; c) número de semente por espiga; d) peso de mil grãos; e) produção de

proteína (kg ha^{-1}); f) percentagem de germinação; g) comprimento, largura e espessura da semente e h) índice de colheita.

A produção final de fitomassa e o rendimento de grãos, em cada parcela, foi obtida de uma área de $7,82 \text{ m}^2$, após eliminar a bordadura. Considerou-se como fitomassa seca apenas a parte da cultura acima do solo. Após a colheita o material foi devidamente identificado e acondicionado em sacos para a secagem até peso constante. Atingido o peso constante, obteve-se o peso da fitomassa total e, após o trilhamento o peso dos grãos. A determinação da altura média de plantas, em cada tratamento, foi obtida tomando medidas do trigo em cinco locais dentro de cada parcela, no momento da colheita. O número de espigas por m^2 , em cada parcela, foi estimado a partir da seleção de uma amostra de linhas de plantio. Para tal, adotou-se o seguinte esquema: eliminou-se as duas primeiras linhas (bordadura) e a partir de então, contou-se as espigas de uma linha a cada quatro. Posteriormente, com base no espaçamento e o comprimento das linhas de plantio fez-se a determinação do número de espigas por metro quadrado.

As medidas do tamanho da espiga, número de espiguetas desenvolvidas e não desenvolvidas e número de grãos por espiga, foram obtidas através de uma amostra de 25 espigas selecionadas ao acaso, em cada parcela experimental. A determinação destes parâmetros foi feita manualmente.

Após o trilhamento do trigo, foi retirada de cada parcela, uma amostra de semente para determinar o peso de mil grãos, comprimento, largura e espessura do grão. Destas amostras também foi feita uma análise química para determinar o teor dos macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg). Uma vez obtidos os resultados da análise química, fez-se o cálculo da percentagem de proteína no grão, segundo as recomendações de Soave & Freitas (1996), empregando a seguinte expressão:

$$\text{Proteína (\%)} = \text{N} \times 5,7 \quad (45)$$

onde: N é a percentagem de nitrogênio na semente.

O índice de colheita (IC), o qual expressa a quantidade de carboidratos translocado para os grãos, foi calculado dividindo a produção de grãos pela fitomassa total acima do solo. Os resultados foram expressos em porcentagem.

3.12. Análises Estatísticas

Como a suspensão da água nos diversos tratamentos ocorreu em diferentes estádios de crescimento da cultura, para testar a hipótese de nulidade de que a ausência de água não afetou o fator de reflectância, relativo às bandas TM₃ e TM₄, bem como o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), cada tratamento foi comparado com a testemunha através do teste “t” para pares de observação (Steel & Torrie, 1980):

$$t = \frac{(X_1 - X_2)}{S_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} = \frac{\bar{d}}{S_{\bar{d}}} \quad (46)$$

onde; $\bar{d}$ é média das diferenças entre os valores do FR (bandas TM3 e TM4) ou do NDVI para as parcelas testemunhas (X_1) e para um dos tratamentos (X_2); $S_{\bar{d}}$ é o desvio padrão da média.

Os resultados obtidos para a radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (AAPAR), para a eficiência fotoquímica (ϵ) e para as variáveis agronômicas foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA). Quando o valor de F foi significativo ao nível de probabilidade de 5%, a diferença entre médias dos tratamentos foi analisada pelo teste “least significant difference” (LSD).

Neste caso o modelo matemático associado a esse delineamento foi:

$$Y_{ij} = \mu + t_i + b_j + e_{ij} \quad (47)$$

onde: μ é a média geral; t_i é o efeito do i-ésimo tratamento na variável dependente, e mede o afastamento da média μ_i em relação a μ ; b_j é o efeito do j-ésimo bloco na

variável dependente e, mede o afastamento da média μ_i em relação a μ ; e_{ij} é o erro aleatório atribuído à observação Y_{ij} , tal que $e_{ij} \cong N(0, \sigma^2)$.

As hipóteses testadas para cada uma das variáveis foram :

$$H_0: t_i = 0, \text{ para todo } i \quad \text{vs} \quad H_1: t_i \neq 0$$

onde: t_i corresponde à média dos tratamentos

O “least significant difference” (LSD) é um teste de comparação múltipla, o qual é empregado para comparar médias, quando o teste F é significativo (Steel & Torrie, 1980). No LSD é computado a menor diferença entre médias dos tratamentos que pode ser considerada significativa:

$$LSD = t_{(\alpha/2, GL)} \times \sqrt{2.QMRes / r} \quad (48)$$

onde: QMRes é o quadrado médio residual; r é o número de repetições e; t é o valor obtido na tabela do teste de Student para $\alpha = 0.05$, com 8 graus de liberdade.

Toda análise estatística foi realizada usando o pacote de análise estatística desenvolvido pela Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 1985).

4 . RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 . Balanço da Água no Solo e Determinação dos Dias “secos”

Para determinar o “esgotamento” da água no solo empregou-se o método do balanço hídrico modificado (BHM), cujos resultados encontram-se no apêndice C, Tabelas C.1 a C.4. Os dados destas tabelas foram utilizados para determinar as curvas de armazenamento da água no solo, as quais são apresentadas nas Figuras 14 a 17. Os dias “secos” ou seca agrônômica foram identificados a partir do momento em que a quantidade de água no solo passou a ser igual ou menor do que o armazenamento crítico (AC), cujos valores para os diferentes tratamentos são também apresentados nas Figuras 14 a 17.

Analisando os resultados do balanço da água no solo nas Tabelas C1 a C4 verifica-se que o tempo gasto para atingir o primeiro dia “seco” nos tratamentos que foram submetidos ao estresse hídrico foram de 17, 7, 4, e 8 dias, respectivamente. Considerando que a perda de água por drenagem em profundidade não varia ao longo do tempo, uma vez que o solo apresenta propriedades físicas relativamente homogêneas, deduz-se assim que as diferenças no número de dias, para atingir o primeiro dia “seco” em cada tratamento, estão relacionadas com as diferentes demandas de água durante o ciclo de desenvolvimento e crescimento do trigo, aliado às condições climáticas reinantes a partir do dia em que a cultura deixou de receber água por irrigação nos respectivos tratamentos.

Os dados climáticos de temperatura máxima, velocidade do vento a dois metros de altura (U_2) e de umidade relativa referentes ao período anterior ao primeiro dia “seco” para os tratamentos que foram submetidos ao déficit hídrico encontram-se na Tabela 7.

Figura 14 - Balanço da água no solo no período de 163 a 191

Figura 15 - Balanço da água no solo no período de 191 a 221

- DÉFICIT HÍDRICO

Figura 16 - Balanço da água no solo no período de 219 a 235

Figura 17 - Balanço da água no solo no período de 235 a 249

- DÉFICIT HÍDRICO

Tabela 7 - Valores médios de temperatura máxima (°C), umidade relativa (%) e velocidade do vento a dois metros de altura (m/s), para o período entre a suspensão de água e o primeiro dia “seco”, nos diferentes tratamentos.

Tratamento	Dias do ano	Dias	Temperatura máxima (°C)	Umid. Relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)
Perfilhamento	163 a 177	17	25,2 ± 1,71	81,7 ± 6,2	1,57 ± 0,26
Espigamento	191 a 196	7	26,8 ± 2,58	81,3 ± 7,4	1,38 ± 0,21
Enchimento	219 a 222	4	31,7 ± 0,76	77,0 ± 11,1	1,76 ± 0,79
Maturação	235 a 243	8	32,6 ± 0,98	55,0 ± 2,1	1,67 ± 0,31

Os dados climáticos contidos na Tabela 7, indicam que durante os estádios de perfilhamento e de espigamento os valores de temperatura máxima, umidade relativa e velocidade do vento não diferem entre si. Logo, essa diferença observada no número de dias, para atingir o primeiro dia “seco”, está correlacionada com os estádios fenológicos da cultura nestes tratamentos.

No caso do perfilhamento (primeira suspensão de água) o prolongado período para atingir o primeiro dia “seco” (17 dias), conforme Tabela C.1 do apêndice C e Figura 14, pode ser associado à incipiente fase de desenvolvimento da cultura que apresentava pouca fitomassa e, portanto, baixa demanda de água, além do que a área de solo explorada pelas raízes também foi pequena, aliado ainda a um solo argiloso que apresenta uma maior resistência à perda de água por evaporação.

Para o espigamento (tratamento 3), o tempo gasto para atingir a condição de déficit hídrico no solo foi de 7 dias (Tabela C.2, Figura 15). Este menor tempo, em relação ao perfilhamento, é explicado tendo em vista que a cultura estava começando a emitir as espigas, portanto, com uma maior atividade metabólica, maior quantidade de fitomassa e um sistema radicular praticamente formado. Essa situação, propiciou uma maior demanda de água pela cultura e, devido ao maior sistema radicular, a área de solo explorada pelas raízes foi maior do que no caso anterior. Neste caso, como houve maior área explorada pelo sistema radicular a influência do tipo de partículas do solo foi menor do que no caso anterior.

Na fase de floração e enchimento de grãos (tratamento 4), o tempo gasto para atingir o primeiro dia “seco” foi de 4 dias (Tabela C.3, Figura 16). Para este tratamento deve-se levar em conta tanto o estágio de desenvolvimento da cultura como as condições climáticas reinantes durante este período. Nesta época, a cultura estava na fase de floração, conseqüentemente, já havia formado todo o sistema radicular e com o máximo vigor vegetativo. Assim, a demanda de água foi maior, quando comparada àquela no início do emborrachamento (tratamento 3). Além disso, observa-se na Tabela 7, que as condições de temperatura máxima ($31,7 \pm 0,76$ °C) e de velocidade do vento ($1,76 \pm 0,79$ °C) propiciaram uma maior evapotranspiração, quando comparadas com o tratamento anterior. Nestas condições, o fluxo de água no sistema solo/planta/atmosfera foi maior, devido ao aumento da demanda evaporativa. Com isto, o primeiro dia “seco” foi atingido mais rapidamente.

Para a fase de maturação, último tratamento (Tabela C.4; Figura 17), o tempo gasto para atingir a condição de déficit hídrico foi de 8 dias, ou seja, 2 vezes maior do que aquele gasto no período de floração (tratamento 4). A demora para atingir o primeiro dia “seco” está relacionada com o estágio de desenvolvimento da cultura que, nesta época, encontrava-se na fase de maturação, com a maioria das folhas senescentes diminuindo significativamente a quantidade de água transpirada pela cultura e, ao mesmo tempo, aumentando, novamente a influência do solo na retenção da água.

Por outro lado, a duração do estresse hídrico nos diferentes tratamentos (Tabelas C.1 a C4 e Figuras 14 a 17) foi de 12, 24, 13 e 7 dias, respectivamente. Durante este período calculou-se o déficit hídrico ($ET_m - ET_r$) e a lâmina de água que deixou de ser aplicada na cultura, nas parcelas estressadas, cujos resultados encontram-se na Tabela 8.

Para melhor entender os resultados contidos na Tabela 8 é necessário, novamente, lançar mão dos valores médios de temperatura máxima, umidade relativa do ar e velocidade do vento ocorridos durante cada período de déficit hídricos (Tabela 9).

Tabela 8 - Evapotranspiração máxima (ETm), evapotranspiração real (ETr), déficit hídrico (ETm - ETr) e lâmina de água (mm) calculados após o primeiro dia “seco” para os diferentes tratamentos.

Tratamento	Período Dia Juliano	Número de dias	ETm (mm)	ETr (mm)	Estresse Hídrico (mm)	(%)	Lâmina de água (mm)
Perfilhamento	178 a 191	12	18,4	3,8	16,0	87	25,6
Espigamento	197 a 221	24	70,8	6,9	63,9	90	97,9
Enchimento	222 a 235	13	42,2	9,7	35,9	85	73,0
Maturação	244 a 249	7	8,12	2,4	5,8	71	29,4

Tabela 9 - Valores médios de temperatura máxima (Tmáx.), umidade relativa (UR) e velocidade do vento a dois metros (U₂) após atingir o primeiro dia “seco”, para os diferentes tratamentos.

Tratamento	Período Dia Juliano	Tmáx. (°C)	UR (%)	U ₂ (m/s)
Perfilhamento	178 a 191	25,0 ± 2,5	80,3 ± 5,4	1,70 ± 0,25
Espigamento	197 a 221	27,0 ± 1,7	76,0 ± 3,6	1,74 ± 0,15
Enchimento	222 a 235	30,7 ± 1,2	68,7 ± 4,1	1,84 ± 0,27
Maturação	224 a 249	31,1 ± 3,3	55,6 ± 3,2	1,67 ± 0,42

Em termos percentuais, os maiores estresses hídricos ocorreram nas fases de perfilhamento, espigamento e enchimento de grãos. Nota-se que a diferença percentual do estresse hídrico para estas três fases de desenvolvimento da cultura foi muito pequena, ou seja, de apenas 2% entre as fases de perfilhamento e de espigamento e de 5% entre o espigamento e enchimento de grãos. Entretanto, observando a Tabela 8, nota-se que o número de dias, em que a cultura foi submetida ao estresse hídrico nestas fases de desenvolvimento, foi 12, 24 e 13 dias, respectivamente. Os valores do estresse hídrico, em milímetros de água, foram bem diferentes, isto é, 16,0; 63,9 e 35,9 mm de água, respectivamente.

Como pode-se perceber em termos percentuais o estresse hídrico foi praticamente igual nos três tratamentos. Porém, quando se compara o estresse hídrico em termos de milímetros de água, percebe-se que na fase de espigamento a demanda por água foi praticamente duas vezes maior do que no enchimento de grãos e 4 vezes, quando comparado ao período de emborrachamento.

Considerando que o solo é bastante homogêneo na área de estudo e que as condições climáticas durante o período de perfilhamento e espigamento foram muito semelhantes (Tabela 9), para se ter uma idéia em qual destes tratamentos o estresse hídrico foi mais prejudicial, aplicou-se o conceito de proporcionalidade entre ambos, ou seja, multiplicando o valor 16,0 mm de água (no perfilhamento) por 2,0 (razão proporcional de dias entre o perfilhamento e o espigamento) resulta-se em 32,0 mm de água, que seria o estresse hídrico na fase de espigamento, considerando apenas o fator tempo. Como o estresse hídrico calculado para a fase de espigamento foi de 63,9 mm de água, chega-se a conclusão de que neste tratamento o efeito do estresse hídrico na cultura do trigo foi maior do que na fase de perfilhamento. Atribui-se o maior consumo de água no espigamento em relação ao perfilhamento às diferenças de estádios vegetativos, ou seja, fase final de emborrachamento e de espigamento.

Por outro lado, aplicando o mesmo raciocínio para as fases de espigamento e de enchimento de grãos, ou seja, multiplicando-se 35,9 mm de água (enchimento de grãos) por 1,85 (razão proporcional de dias entre o espigamento e o enchimento de grãos) resulta-se em 66,3 mm de água, que é 3 mm maior do que o obtido na fase do espigamento. Esta diferença, embora insignificante, está relacionada com o maior valor da temperatura máxima ($30,7 \pm 1,2$ °C) e menor umidade relativa ($68,7 \pm 4,1$ %) observada na fase de enchimento de grãos em relação à fase de espigamento (Tabela 9). No entanto, pode-se dizer que o estresse hídrico nestes dois tratamentos foi, relativamente, da mesma magnitude.

Finalmente, comparando os valores do estresse hídrico, tanto percentual quanto em milímetros de água na Tabela 9, para as fases de enchimento de grãos (tratamento 4) e de maturação (tratamento 5), percebe que na fase de maturação o consumo de água foi bem menor do que na fase de enchimento de grãos. Neste

caso, a diferença percentual foi de 14% e, aplicando o mesmo raciocínio anterior, isto é, multiplicando-se 5,8 mm de água por 1,86 (razão proporcional de dias entre os dois tratamentos) resulta-se em 10,8 mm, que seria o valor proporcional do estresse hídrico que deveria ter ocorrido na maturação, ou seja, 3,3 vezes menor do que àquele observado durante o enchimento de grãos. Este resultado mostra que a menor demanda de água na maturação está relacionada com o estágio fenológico da cultura, ou seja, final de maturação e com a maioria das folhas senescentes.

Comparando os dados climáticos contidos na Tabela 1 com aqueles do apêndice F (Tabelas E.1 a E.3), constata-se que o inverno de 1995 foi atípico, ou seja, houve ocorrências de temperaturas máximas bem superiores àquelas observadas por Ometto (1989). Isto provocou uma redução no ciclo da cultura que é de 115 a 120 dias, para 92 dias. Esta redução no ciclo da cultura concorda com Wiegand & Cuellar (1981), os quais observaram que quando a temperatura do ar atingiu níveis acima de 28 °C, no período de enchimento e maturação do grão, houve uma redução de três dias para cada grau centígrado acima deste limiar.

4.2 - Efeito do Estresse Hídrico sobre a Resposta Espectral nas Bandas TM₃ e TM₄ e sua Transformação para o NDVI.

Durante os 92 dias em que a cultura do trigo permaneceu no campo foi possível realizar 54 campanhas radiométricas, entre 16 de junho, época em que a cultura apresentava-se com três folhas (± 10 cm de altura) e 5 de setembro, quando o trigo estava maduro. Com raras exceções, obteve-se medidas radiométricas diariamente.

As Figuras 18 e 19 contêm as curvas de tendências dos valores do FR nas bandas TM₃ e TM₄ dos cinco tratamentos, ao longo do ciclo da cultura.

Conforme pode ser observado na Figura 18, os valores do FR na banda TM₃, para os diferentes tratamentos, ao longo do ciclo da cultura, apresentaram semelhança entre si. No início do ciclo da cultura o FR máximo foi em torno de 6%, devido à menor absorção da radiação solar em decorrência da pouca fitomassa, aliado à reflexão da radiação proveniente do solo (superfície de fundo). Com o

desenvolvimento da cultura, ou seja, aumento da quantidade de fitomassa, a absorção da radiação nesta faixa do espectro eletromagnético também aumentou. Aumentando a absorção, o FR decresceu até próximo de 2% e permaneceu neste valor entre os dias julianos 190 a 225, época em que a cultura estava nas fases de espigamento e enchimento de grãos. Após este período, isto é, início da maturação, o FR aumentou, gradativamente, até valores entre 8 a 11%, quando a cultura estava completamente madura. Este aumento no FR é justificável uma vez que as folhas, principalmente, às inferiores do dossel da cultura, entraram em senescência causando a degradação das clorofilas. Com isso, houve menor absorção da radiação solar pelo dossel da cultura, conseqüentemente, aumentando o FR. Além disso houve a contribuição da reflectância do solo no aumento do FR tal como aconteceu no início do ciclo da cultura. Esse aumento da reflectância no final do ciclo da cultura está de acordo com Guyot (1991) ao afirmar que na senescência a reflectância aumenta na região do visível.

Figura 18 - Fator de reflectância na banda TM₃, obtido ao longo do ciclo da cultura do trigo, para os diferentes tratamentos.

Figura 19 - Fator de reflectância na banda TM_4 , obtido ao longo do ciclo da cultura do trigo, para os diferentes tratamentos.

O valor do FR na banda TM_4 (Figura 19), obtido ao longo do ciclo da cultura apresenta comportamento semelhante para os cinco tratamentos. Entretanto, nesta banda espectral verifica-se que houve maior variação na magnitude dos valores do FR, quando comparados àqueles obtidos na banda TM_3 . Além disso, é possível perceber que nas fases de espigamento, de enchimento de grãos e de maturação os valores do FR foram superiores em relação à testemunha. Esse fato pode estar relacionado com a redução do turgor celular, que induz mudanças no número de superfícies reflectivas causado pelo desarranjo nas estruturas celulares internas da folha, ocasionando, assim, um aumento na reflectância do infravermelho próximo Myers (1970).

No caso do tratamento em que o estresse hídrico foi aplicado durante o perfilamento, verifica-se que a partir do dia do ano 180 (Figura 19) os valores do FR na banda TM_4 foram menores do que os da testemunha. Esse resultado é

atribuído à menor quantidade de fitomassa, em consequência de um menor perfilhamento do trigo, provocado pela suspensão da irrigação numa fase em que a cultura estava desenvolvendo os perfilhos. Tal fato pode ser verificado pelo menor índice de área foliar, conforme consta na Figura (20). De qualquer forma, essa redução nos valores do FR do tratamento 2 (perfilhamento) em relação à testemunha, concorda com Gardner et al. (1985), Westgate & Boyer (1986) e Westgate & Peterson (1993) os quais afirmam que durante o início do crescimento vegetativo, até mesmo um estresse hídrico de pequena intensidade reduz a expansão das folhas, afetando o índice de área foliar em estádios posteriores, consequentemente, a reflectância das folhas que compõem o dossel da cultura.

Figura 20 - Índice de área foliar, obtido para os cinco tratamentos, do perfilhamento até o início da maturação.

Os valores dos índices de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtidos a partir dos fatores de reflectância nas bandas TM_3 e TM_4 , ao longo do ciclo da cultura, estão contidos na Figura 21.

Figura 21 - Índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), obtido, ao longo do ciclo da cultura do trigo, para os diferentes tratamentos.

Analisando a trajetória do NDVI na Figura 21 verifica-se que, independente do estágio de desenvolvimento em que a cultura sofreu estresse hídrico, o comportamento, ao longo do ciclo da cultura, foi semelhante para os cinco tratamentos, ou seja, todos apresentaram um comportamento em forma de parábola, tendo nas fases inicial e final do ciclo da cultura valores em torno de 0,2 e atingindo um máximo em torno de 0,9 entre os dias do ano 190 e 225, exceto para o tratamento 2 (perfilhamento), cujo valor máximo foi de 0.8 entre os dias 210 e 215. Esse comportamento em forma de parábola está de acordo com vários pesquisadores, entre eles Formaggio (1989).

Tendo em vista que a suspensão da água, nos diferentes tratamentos ocorreu em épocas diferentes, a análise estatística foi feita com base no teste *t* para pares de observações, entre a testemunha e cada um dos tratamentos, desde o início da suspensão da água até o final da maturação. O teste *t* foi aplicado para o FR nas bandas TM_3 e TM_4 e para o NDVI, conforme será apresentado a seguir.

4.2.1 - Análise do FR nas bandas TM₃ e TM₄ e do NDVI para o tratamento 2 (perfilhamento).

A comparação dos valores do FR nas bandas TM₃ e TM₄ e do NDVI, do tratamento 2 (perfilhamento) com a testemunha, através do teste *t*, foi realizada para 38 campanhas radiométricas, isto é, do dia do ano 174 (onze dias após o início do tratamento) até o dia 247 (final da maturação da cultura), cujos resultados encontram-se no apêndice D, Tabelas D.1 a D.3.

Analizando os resultados do teste *t* contidos na Tabela D.1, verifica-se que na maioria das datas o FR na banda TM₃ não diferiu estatisticamente daquele obtido para a testemunha. Com isso, é possível afirmar que a suspensão da irrigação e, conseqüentemente, o estresse hídrico nos 14 dias finais do tratamento 2, não foi suficiente para alterar a reflectância do dossel do trigo nesta região do espectro eletromagnético. Isto indica que o estresse hídrico deve ter sido brando, a ponto de não afetar o teor de clorofila nas folhas que compõem o dossel do trigo, concordando com Thomas et al. (1971) e Guyot (1990) ao afirmarem que em condições de campo é necessário ocorrer um estresse hídrico extremamente severo para afetar as propriedades ópticas das folhas na faixa do visível.

As poucas diferenças significativas observadas no FR na banda TM₃, à exceção do dia juliano 185 (final do período do estresse hídrico) ocorreram após o reinício das irrigações e, em períodos de no máximo dois dias consecutivos. Estes resultados indicam que essas diferenças observadas ($p < 0,05$) devem estar relacionadas com a maior sensibilidade da cultura nas parcelas estressadas à mudanças das condições climáticas ocorridas nestes dias como aumento de temperatura e diminuição da umidade relativa, que provocou o fechamento estomatal mais rapidamente neste tratamento quando comparado à testemunha, proporcionando assim, um aumento significativo na reflectância nesta faixa espectral.

Analizando os resultados do teste *t*, obtidos para o tratamento 2 e para a testemunha na Tabela D.2 (apêndice D), verifica-se que o efeito do estresse hídrico no FR na banda TM₄ foi altamente significativo a partir do dia juliano 202

202 (21/07/95) até o final do ciclo da cultura. Por outro lado, observando-se, ainda na Tabela D.2, as diferenças dos valores do FR entre a testemunha e o tratamento 2 (perfilhamento) nota-se que das 35 medidas radiométricas realizadas após a suspensão da água, em 26 delas, os valores do FR do tratamento 2 foram inferiores aos da testemunha, cuja primeira observação ocorreu no dia juliano 182 (dois dias após o primeiro dia “seco”). Esta menor reflectância observada no dossel do tratamento 2, não foi provocada por mudanças nas estruturas internas das folhas conforme relata Gardner et al. (1985), Westgate & Boyer (1986) e Westgate & Peterson (1993) e sim pelo menor desenvolvimento da planta, em consequência da restrição da água, que causou um menor IAF (Figura 20), proporcionando uma menor reflectância do dossel da cultura, nesta faixa do espectro eletromagnético, aliado, ainda, à contribuição do solo de fundo. Para ilustrar graficamente o efeito do estresse hídrico, neste tratamento, sobre o FR do dossel do trigo na região do vermelho (bandas TM₃) e do infravermelho próximo (banda TM₄), selecionou-se as curvas espectrais do FR do tratamento 2 e da testemunha para o dia do ano 221 (Figura 22).

Figura 22 - Curvas do fator de reflectância para o tratamento 2 e a testemunha do dia 09/08/95, ilustrando as diferenças do FR nas bandas TM₃ e TM₄.

Pelos resultados obtidos para o FR, nas bandas TM_3 e TM_4 (Tabelas D.1 e D.2), nota-se que é possível identificar o efeito do estresse hídrico somente através dos dados espectrais obtidos no infravermelho próximo, já que os resultados do teste t , para o FR nas bandas do TM_3 não foram significativos, para a maioria das medidas radiométricas realizadas, quando comparados à testemunha.

Com relação aos valores do NDVI observa-se que as diferenças entre o tratamento 2 (perfilhamento) e a testemunha (Tabela D.3) foram coincidentes com os resultados do FR na banda TM_4 . Isto indica que os valores do NDVI estão mais relacionados com as diferenças observadas nos valores do FR na banda TM_4 do que na banda TM_3 , conforme apresentado nas Tabelas D.1 e D.2.

4.2.2 - Análise do FR nas bandas TM_3 e TM_4 e do NDVI para o tratamento 3 (espigamento).

A comparação dos valores do FR nas bandas TM_3 e TM_4 e do NDVI do tratamento 3 (espigamento) com a testemunha, através do teste t , foi realizada para os dados de 30 campanhas radiométricas, ou seja, do dia juliano 195 (cinco dias após o início do tratamento) até o dia 247 (final da maturação da cultura), cujos resultados encontram-se no apêndice D, Tabelas D.4 a D.6.

Para o tratamento 3 (espigamento) o efeito do estresse hídrico, sobre o FR nas bandas TM_3 e TM_4 , foi diferente daquele observado para o tratamento 2 (perfilhamento). Observa-se na Tabela D.4 que das 30 campanhas radiométricas, 18 delas apresentaram diferenças significativas ($p < 0,01$) para o FR da banda TM_3 e ocorreram, em sua maioria, entre o dia juliano 219 (3 dias antes do reinício da irrigação) e o final do ciclo da cultura.

Este comportamento do FR na banda TM_3 pode ser atribuído, em parte, ao fechamento estomatal e, em parte, à diminuição da concentração das clorofilas a e b (Bauer et al., 1980; Ripple, 1986). Com a redução da concentração das clorofilas a e b ocorreu uma menor absorção da radiação na região do visível (banda TM_3), causando um aumento na reflectância, conforme pode ser visto na Tabela D.4. Esses resultados também indicam que mesmo após o reinício da

irrigação do tratamento 3 a cultura não restabeleceu a concentração inicial de clorofila e, por esta razão, as diferenças no FR foram significativas até o final do ciclo da cultura.

Por outro lado, analisando os resultados do teste *t* na Tabela D.5, verifica-se que as diferenças nos valores do FR na banda TM₄, entre este tratamento e a testemunha, começaram a serem significativas antes de atingir o primeiro dia “seco” (dia juliano 198), isto é, no dia 195 (três dias após a suspensão da água). Observa-se também, nos dados contidos na Tabela D.5, que a partir do reinício da irrigação (dia juliano 222), apesar do FR do tratamento 3 ter sido maior do que o da testemunha (segunda coluna), essas diferenças não foram significativas a não ser nos dias 228, 236 e 247.

O comportamento do FR na banda TM₄, para o tratamento 3 (espigamento), pode ser explicado pela diminuição do turgor celular das folhas que compõem o dossel da cultura, provocado pelo efeito do estresse hídrico. Com a diminuição do turgor celular houve mudanças nas superfícies reflectivas, devido ao desarranjo nas estruturas internas celulares das folhas, consequentemente, aumentando a reflectância no infravermelho próximo.

Por outro lado, o fato de se ter constatado diferenças significativas no FR na banda TM₄, antes mesmo de atingir o primeiro dia “seco”, parece reforçar, em parte, as afirmações de Richards & Waldleigh (1953) citados por Reichardt (1993) de que a disponibilidade de água para as plantas decresce com a diminuição paulatina da umidade do solo.

Após o reinício da irrigação (dia do ano 222), verifica-se que as diferenças entre o FR na banda TM₄, na maioria das vezes, não foram significativas ($p < 0,05$), indicando assim, uma recuperação imediata do turgor celular nas plantas que foram submetidas ao estresse hídrico. As diferenças estatísticas observadas no FR para os dias do ano 228, 236 e 247, ao nível de 5 % de probabilidade, é provável que estejam relacionadas com as mudanças nas condições climáticas ocorridas nestes dias que afetaram, primeiramente, as plantas que sofreram estresse hídrico, devido à maior fragilidade das mesmas em relação à testemunha.

Para enfatizar as diferenças observadas no FR nas bandas TM_3 e TM_4 , entre o tratamento 3 e a testemunha, selecionou-se os dados espectrais do dia juliano 225, os quais são mostrados na Figura 23.

Figura 23 - Curvas do fator de reflectância para o tratamento 3 e a testemunha do dia 13/08/95, ilustrando as diferenças do FR nas bandas TM_3 e TM_4 .

A comparação dos valores do NDVI do tratamento 3 e da testemunha são apresentadas na Tabela D.6. Dos 30 valores obtidos para o NDVI, 23 deles foram significativos, ao nível de 5 ou 1% de probabilidade. Observa-se também que as diferenças significativas nos valores do NDVI, para este tratamento e a testemunha, expressou melhor o efeito do estresse hídrico sobre a cultura do trigo, do que quando este foi analisado através do FR em bandas isoladas. Os resultados do NDVI concordam com as afirmações de Chen et al. (1986), Vygodskaya et al. (1989) e Wiegand et al. (1991) que apontam o índice de vegetação como um bom indicador de parâmetros agronômicos.

4.2.3 - Análise do FR nas bandas TM_3 e TM_4 e do NDVI para o tratamento 4 (enchimento de grãos).

A comparação dos valores do FR nas bandas TM_3 e TM_4 e do NDVI para o tratamento 4 (enchimento de grãos) e a testemunha foi realizada para dados obtidos de 19 campanhas radiométricas, ou seja, do dia juliano 219 até o final do ciclo da cultura, cujos resultados encontram-se no apêndice D, Tabelas D.7 a D.9.

Analizando os resultados do teste t na Tabela D.7, verifica-se que o efeito do estresse hídrico foi altamente significativo para o FR na banda TM_3 ($p < 0,01$), em relação à testemunha. Além disso, verifica-se também que essas diferenças significativas começaram a se manifestar no dia juliano 224 (um dia após o primeiro dia “seco”) e foram até o final do ciclo da cultura.

Tal como foi discutido para o tratamento 3, esse comportamento do FR na banda TM_3 também deve estar associado ao fechamento estomatal e redução na concentração nos níveis das clorofilas a e b . Neste caso, a única diferença em relação ao tratamento 3 é que os valores do FR deste tratamento começaram a ser significativos, em relação à testemunha, logo no início do estresse hídrico. O fechamento estomatal ocorreu durante o estresse hídrico, em consequência, provavelmente, do aumento da síntese do ácido abissínio (ABA) pela diminuição da disponibilidade da água no solo para as plantas (Gardner et al., 1985 e Taiz & Zeiger, 1991) e, consequentemente, um aumento na reflectância na região do vermelho do espectro eletromagnético (Tucker et al., 1980 e Bauer et al., 1980). Aliado a este fato, houve também a degradação das clorofilas a e b que alterou o comportamento espectral da cultura após o reinício da irrigação.

No caso do FR na banda TM_4 (Tabela D.8) as diferenças estatísticas observadas neste tratamento, aos níveis de 5 ou 1% de probabilidade, foram muito parecidas com aquelas observadas para o tratamento 3, ou seja, ocorreram antes e durante o estresse hídrico. Ao se reiniciar a irrigação houve um restabelecimento do turgor celular e essas diferenças deixaram de ser significativas. As diferenças no FR constatadas nos dias juliano 241, 245 e 247 podem ser atribuídas ao efeito do estresse hídrico, porém induzidas pelas condições de temperatura alta e umidade relativa

baixa, conforme pode ser visto no apêndice F, Tabela F.3. Nas Figuras 24 e 25 são mostrados os efeitos do estresse hídrico sobre o FR nas bandas TM_3 e TM_4 para duas datas: uma durante o período de estresse hídrico (dia juliano 232) e outra, após o reinício da irrigação (dia juliano 240).

Pelos resultados do teste t na Tabela D.9, nota-se que as diferenças estatísticas entre os valores do NDVI, do tratamento 4 (enchimento) e à testemunha, ocorreram até o dia do ano 239, época em que a cultura do trigo estava no final da maturidade fisiológica e início da maturação. Tal como foi discutido no tratamento 3, o NDVI foi um melhor estimador dos efeitos do estresse hídrico quando comparado com as bandas individuais.

Figura 24 - Curvas do fator de reflectância para o tratamento 4 e a testemunha do dia 20/08/95, ilustrando as diferenças do FR nas bandas TM_3 e TM_4

Figura 25 - Curvas do fator de reflectância obtidas para o tratamento 4 e a testemunha do dia 28/08/95, ilustrando as diferenças do FR nas bandas TM_3 e TM_4 .

4.2.4 - Análise do FR nas bandas TM_3 e TM_4 e do NDVI para o tratamento 5 (maturação).

A comparação dos valores do FR nas bandas TM_3 e TM_4 e do NDVI entre o tratamento 5 (maturação) e a testemunha, foi realizada para dados radiométricos de 7 campanhas de campo, ou seja, do dia juliano 239 até o final do ciclo da cultura, cujos resultados encontram-se no apêndice D, Tabelas D.10 a D.12.

Analisando as Tabelas D.10 e D.11, nota-se que os resultados do teste t não apresentaram diferença significativa para as comparações do FR tanto na banda TM_3 quanto na banda TM_4 . De acordo com estes resultados, pode-se dizer que o estresse hídrico, quando aplicado no período de maturação da cultura, não foi suficiente para afetar os valores do FR nas bandas TM_3 e TM_4 . Entretanto, observa –

se na Tabela D.12 que no final do ciclo da cultura, isto é, a partir do dia do ano 242, os resultados do teste *t* foram significativos ($p < 0,05$) para os valores do NDVI, indicando mais uma vez, que o índice é mais eficiente para detectar variações no comportamento espectral do dossel do trigo do que as bandas individuais.

4.3. Efeito do Déficit Hídrico na Eficiência do Uso da Radiação Fotossinteticamente Ativa

Os resultados da AAPAR, da eficiência do uso radiação para produção de fitomassa (ϵ_F) e para produção de grãos (ϵ_G) encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Análise de variância para radiação fotossinteticamente ativa absorvida acumulada (AAPAR), eficiência do uso da radiação para produção de fitomassa (ϵ_F) e eficiência do uso radiação para a produção de grão (ϵ_G).

Tratamento	AAPAR MJ m ⁻²	D.R. (%)	ϵ_F g MJ ⁻¹	D.R. (%)	ϵ_G g MJ ⁻¹	D.R. (%)
Testemunha	333 a	-	2,34 a	-	0,90 a	-
Perfilhamento	295 b	- 11,7	1,83 c	- 22,8	0,71 b	- 21,1
Espigamento	350 a	4,8	1,98 b	- 15,4	0,70 b	- 22,2
Enchimento	351 a	5,1	2,27 a	- 3,1	0,70 b	- 22,2
Maturação	357 a	6,9	2,32 a	- 0,9	0,82 a	- 8,9
Valor F	5,20 *	-	35,20**	-	12,40 *	-
LSD (0,05)	36	-	0,13	-	0,08	-
QME	19,20	-	0,68	-	0,44	-
CV (%)	5,68	-	3,15	-	5,71	-

*, ** Significativo aos níveis de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente.
 Tratamentos com letras iguais não diferem significativamente entre si ao nível de 5 % de probabilidade.
 D. R. = diferença em relação à testemunha

Pelos resultados da análise de variância e do teste LSD, contidos na Tabela 10, pode-se afirmar que quando o estresse hídrico foi aplicado na fase de perfilhamento os valores da AAPAR para este tratamento em relação à testemunha foram significativamente reduzidos ($p < 0,05$), cuja diferença relativa foi de -11,7%. A suspensão da irrigação para este tratamento (perfilhamento) ocorreu no início do crescimento vegetativo, quando as plantas apresentaram três folhas (± 10 cm de

altura). O estresse hídrico ocorreu no período de intenso perfilhamento da cultura. Havendo menor número de plantas por metro quadrado, o índice de área foliar foi menor (Figura 20) ocorrendo uma menor absorção da radiação fotossinteticamente ativa. Este resultado está de acordo com Gardner et al. (1985), Westgate & Boyer (1986) e Westgate & Peterson (1993) os quais afirmam que, durante o desenvolvimento vegetativo, até mesmo um estresse hídrico de pequena intensidade reduz a expansão foliar, afetando o IAF em estádios posteriores e, conseqüentemente, a absorção da radiação solar.

Analizando os resultados da eficiência do radiação para produção de fitomassa (ϵ_F) na Tabela 10, verifica-se que o estresse hídrico afetou significativamente os tratamentos 2 e 3 (perfilhamento e espigamento, respectivamente), ao nível de 1 % de probabilidade. O valor mais baixo foi obtido para o tratamento 2 com $1,83 \text{ g MJ}^{-1}$ ($p < 0,01$) o que corresponde a uma redução de 22,8 % em relação à testemunha. Embora não se constatou diferenças estatísticas nos resultados da AAPAR para o tratamento 3 em relação à testemunha, nota-se que no caso da eficiência do uso da radiação para produção de fitomassa houve uma redução de 15,4% ($p < 0,05$). Isso, pode ter sido conseqüência da época em que foi aplicado o estresse hídrico aliado, ainda, ao aumento de temperatura, concordando com Asrar et al. (1984), Unsworth et al. (1984) e Demetriades-Shah et al. (1992).

O efeito do estresse hídrico quando aplicado nas fases de perfilhamento, espigamento e enchimento de grãos foi semelhante para a eficiência do uso da radiação para a produção de grãos, cujos valores foram reduzidos em 21,1; 22,2 e 22,2%, respectivamente, em relação à testemunha. A provável explicação da semelhança nos valores do ϵ_G , nesses tratamentos é que o estresse hídrico deve ter atuado de forma semelhante em alguns processos bioquímicos da planta o que reduziu na mesma magnitude o fracionamento da radiação para a produção de grão, independente do estágio de desenvolvimento da cultura. Por outro lado, como afirma Demetriades-Shah et al. (1992), a eficiência com que a radiação absorvida é convertida em produção de matéria seca deve ser vista com cuidado, uma vez que a radiação é somente uma das muitas variáveis relacionadas com a produção de fitomassa e grão.

4.4. Déficit Hídrico e sua Relação com Parâmetros Agronômicos

Na Tabela 11 estão contidos os resultados da análise de variância obtidos para altura média de planta (AMP), número de espiga por metro quadrado (NEMQ), número de sementes por espiga (SPE), peso de 1000 grãos (PMG), produção de fitomassa (FITO), produção de grãos (GRÃO), índice de colheita (IC) e produção de proteína (PROT).

De acordo com os resultados estatísticos contidos na Tabela 11 pode-se afirmar que o estresse hídrico teve efeito significativo para todas as variáveis agronômicas analisadas. A intensidade do efeito do estresse hídrico variou em função do parâmetro analisado e da fase em que a cultura foi submetida ao estresse hídrico.

Com relação à altura média de planta (AMP) percebe-se que o efeito do estresse hídrico foi mais prejudicial para a fase de perfilhamento (tratamento 2), cuja redução em relação à testemunha de 11,1 % ($p < 0,05$).

O número de espiga por metro quadrado (NEMQ) foi afetado pelo estresse hídrico durante às fases de perfilhamento e espigamento. Em ambos tratamentos, os resultados foram significativos ($p < 0,05$) em relação à testemunha com uma redução de 35,3 e 16,9 %, respectivamente. Os resultados obtidos para NEMQ e peso de 1000 grãos (PMG) estão de acordo com Asana & Colleagues (1958), citados por Kirkham & Kanemasu (1985), ao afirmarem que, quando o estresse hídrico ocorre durante o período de crescimento da cultura, reduz o potencial da planta quanto ao número de espigas por metro quadrado. Se o estresse ocorre durante o enchimento do grão reduz seu peso, como aconteceu no tratamento 4 (enchimento).

O estresse hídrico afetou de maneira significativa ($p < 0,05$) o número de sementes por espiga (SPE) em todas as fases em que foi aplicado, quando comparado à testemunha. Entretanto, as maiores diferenças relativas foram observadas quando o estresse hídrico foi aplicado nos estádios de espigamento e enchimento de grãos, com uma redução de 13,2% para ambos estádios fenológicos. Estes resultados podem ser explicados com base nas afirmações de Saini & Aspinall

(1981) e Gusta & Chen (1987), que quando a cultura se desenvolve em condições desfavoráveis de umidade no solo induz a ocorrência de esterilidade do estame, causando inviabilidade do grão de pólen, reduzindo assim o número de sementes por espiga, o que leva a uma redução da produção final.

Por outro lado, analisando os resultados referentes ao peso de mil grãos (PMG), constata-se que apenas o tratamento 4 foi afetado significativamente pelo estresse hídrico (30,8 g/1000 grãos), quando comparado à testemunha ($p < 0,05$) com uma redução de 13,6%. Esse resultado foi interessante porque mostrou a importância da água na fase de enchimento dos grãos e confirma os resultados obtidos em casa de vegetação, de vários pesquisadores, entre eles Freitas et al. (1985).

Para a produção de fitomassa (FITO) o estresse hídrico afetou de maneira significativa ($p < 0,01$) a cultura durante o perfilhamento e o espigamento, que apresentaram uma redução na fitomassa de 30,9 e 11,4 %, respectivamente, em relação à testemunha.

A produção de grãos para a cultura do trigo é predominantemente determinada pelas variáveis: número de espigas por metro quadrado, número de sementes por espiga e peso do grão. Analisando os resultados da Tabela 11, constata-se que o efeito do estresse hídrico quando aplicado nas fases de perfilhamento provocou uma redução na produção de grãos de 29,6 % em relação à testemunha. Essa redução na produção de grãos pode ser explicada pelo menor número de plantas por metro quadrado em consequência do efeito do estresse hídrico.

Quando o estresse hídrico foi aplicado durante o espigamento e o enchimento de grãos, a redução na produção foi de 18,7 e 17,5%, respectivamente, em relação à testemunha. As causas da redução na produção de grãos para estes dois tratamentos, têm diferentes origens. No tratamento 3 (espigamento) ocorreu uma significativa redução no peso do grão devido, principalmente, ao reduzido NEMQ (-16,9% em relação à testemunha). Já a redução na produção de grãos, quando o estresse hídrico foi aplicado durante o enchimento de grãos (tratamento 4), foi consequência da significativa redução no peso de 1000 grãos (-13,6% em relação à testemunha).

Tabela 11 - Análise de variância para altura média (AMP), número de espigas por metro quadrado (NEMQ), sementes por espiga (SPE), peso de mil grãos (PMG), produção de fitomassa (FITO) e produção de grãos (GRÃO) e índice de colheita (IC) e produção de proteína (PROT).

Tratamento	AMP (cm)	D. R. (%)	NEMQ (m ²)	D. R. (%)	SPE	D. R. (%)	PMG g	D. R. (%)	FITO kg ha ⁻¹	D. R. (%)	GRÃO kg ha ⁻¹	D. R. (%)	IC (%)	D. R. (%)	PROT kg ha ⁻¹	D. R. (%)
Testemunha	72,0 ab	-	408 a	-	38 a	-	35,7 a	-	7825 ab	-	2994 a	-	38,3 ab	-	461 a	-
Perfilhamento	64,0 c	- 11,1	264 c	- 35,3	35 b	- 7,9	35,3 a	- 1,1	5405 c	- 30,9	2106 b	- 29,7	38,8 a	1,3	325 c	- 29,6
Espigamento	68,6 b	- 4,7	339 b	- 16,9	33 b	- 13,2	35,9 a	0,9	6932 b	- 11,4	2453 b	- 18,1	35,4 bc	- 7,6	359 bc	- 22,1
Enchimento	74,5 a	3,5	416 a	1,9	33 b	- 13,2	30,8 b	- 13,6	7966 a	1,8	2470 b	- 17,5	31,0 d	- 19,1	369 bc	- 20,0
Maturação	72,8 a	1,1	420 a	2,9	34 b	- 10,5	34,6 a	- 2,9	8288 a	5,9	2923 a	- 2,4	35,3 c	- 7,9	429 ab	- 6,9
Valor F	10,30 *	-	11,69 *	-	6,33 *	-	11,5 *	-	17,8 **	-	7,74 *	-	12,5 *	-	6,53 *	-
LSD (0,05)	4,033	-	64,485	-	2,760	-	2,031	-	899,820	-	431,310	-	2,819	-	69,429	-
CV (%)	3,03	-	9,26	-	4,21	-	3,13	-	6,56	-	8,85	-	4,29	-	9,51	-

*, ** Significativo ao nível de $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente

Tratamentos com letras iguais não diferem significativamente entre si ao nível de 5 e 1 % de probabilidade pelo LSD.

D. R. = Diferença Relativa à testemunha

Por outro lado, a redução no peso de 1000 grãos está relacionada com a redução na largura (6,3%) e na espessura (-8,8%) do grão, quando comparado à testemunha, conforme pode ser visto no apêndice E, Tabela E.1.

O déficit hídrico de 5,4 mm de água que a cultura sofreu nos 6 dias finais da maturação (tratamento 5), não afetou de forma significativa a produção de grãos quando comparado à testemunha. Porém, analisando os resultados obtidos para o índice de colheita (IC), das parcelas de trigo que foram estressadas durante o espigamento, enchimento de grãos e maturação, verifica-se que a redução em relação à testemunha foi de 7,6; 19,1 e 7,9 % ($p < 0,05$), respectivamente. No entanto, quando o estresse hídrico foi aplicado na fase de perfilhamento (tratamento 2), o IC foi semelhante àquele obtido para a testemunha, embora tenha produzido a menor fitomassa e uma redução na produção de grãos de 29,7 % em relação à testemunha. Estes resultados permitem deduzir que, em termos de IC, este cultivar é sensível ao estresse hídrico quando ele ocorre a partir do estágio de espigamento. Porém, o estresse hídrico foi marcante na fase de enchimento de grãos, com uma redução de 19,1 % em relação à testemunha. No caso do tratamento 2 (perfilhamento), que teve a menor produção de fitomassa e a maior redução de produção de grãos, o IC não foi significativo quando comparado à testemunha. Isto indica que o estresse hídrico quando foi aplicado na fase de desenvolvimento, afetou o perfilhamento, resultando numa menor produção de fitomassa e num menor número de espiga por metro quadrado. Porém não afetou o translocamento de fotoassimilado para os grãos em estádios posteriores. Diante desta constatação é possível dizer que, em termos do IC, este cultivar apresenta uma certa tolerância ao estresse hídrico, nesta fase de desenvolvimento.

Do ponto de vista agrônomo, os valores obtidos para os índices de colheita foram interessantes por duas razões: a primeira e a mais importante, é que estes valores permitiram afirmar que esta variedade apresentou uma sensibilidade ao estresse hídrico nas fase de espigamento, enchimento de grãos e maturação. Porém, essa sensibilidade foi bem maior quando o estresse hídrico foi aplicado na fase de enchimento de grãos (-19,1 %). A segunda razão é uma transcrição das afirmativas de Donald & Hamblin (1976) os quais comentam que o emprego do IC num processo

de seleção de variedades resistentes à seca, é o parâmetro mais apropriado para o critério de seleção.

Com relação à produção de proteína (kg ha^{-1}) foi verificado uma redução de 29,6; 22,1 e 20,0 %, quando o estresse hídrico foi aplicado nas fases de perfilhamento, espigamento e enchimento de grãos, respectivamente, em relação à testemunha.

Como houve um efeito significativo do estresse hídrico sobre a produção de proteína e, como esta foi obtida através da percentagem de nitrogênio contido no grão, aplicou-se a análise de variância nos resultados da percentagem de nitrogênio na semente. Também foi realizada a análise de variância para os demais macronutrientes: fósforo, potássio, cálcio e magnésio (Tabela 12).

Tabela 12 - Análise de variância para o conteúdo dos macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) na semente de trigo para os cinco tratamentos.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg
	(%)				
Testemunha	2,69	0,16	0,32	0,05	0,09
Perfilhamento	2,71	0,17	0,29	0,04	0,08
Espigamento	2,57	0,18	0,27	0,04	0,08
Enchimento	2,62	0,19	0,34	0,05	0,09
Maturação	2,54	0,16	0,31	0,04	0,08
Valor F	28,9 ns	84,5 ns	62,4 ns	54,9 ns	23,7 ns
CV (%)	3,8	19,3	18,7	20,8	8,3

Os resultados da análise de variância contidos na Tabela 12 indicam que o estresse hídrico não teve efeito significativo sobre os macronutrientes na semente. Com relação ao nitrogênio pode-se afirmar que o efeito do estresse hídrico não foi suficiente para afetar a remobilização da planta para a semente, concordando com os resultados obtidos por Kiniry (1993) e Palta et al. (1994). Entretanto, estes resultados contradizem aqueles observados por Shimishi & Kafkafi (1978), que observaram uma redução de 180 para 120 kg ha^{-1} , quando a cultura do trigo sofreu um estresse hídrico durante o período de enchimento de grãos. Portanto, a menor

observaram uma redução de 180 para 120 kg ha⁻¹, quando a cultura do trigo sofreu um estresse hídrico durante o período de enchimento de grãos. Portanto, a menor produção de proteína observada, quando o estresse hídrico foi aplicado nas fases de perfilhamento, espigamento e enchimento de grãos, em relação à testemunha, não pode ser atribuída à menor percentagem de nitrogênio na semente, mas sim à menor produção de grãos.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os objetivos propostos e a análise dos resultados obtidos chegou-se às seguintes conclusões:

- O efeito do estresse hídrico, no comportamento espectral do dossel do trigo nas bandas TM_3 e TM_4 e nos valores do NDVI, foi significativo ($p < 0,05$ e $0,01$) e bastante variado e dependeu, essencialmente, do estágio de desenvolvimento da cultura.
- O efeito do estresse hídrico na eficiência do uso da radiação para a produção de fitomassa (ϵ_F) foi significativo ($p < 0,01$) nos estádios de perfilhamento e espigamento, com redução de 22,8 e 15,4 %, respectivamente, em relação à testemunha.
- O efeito do estresse hídrico na eficiência do uso da radiação para a produção de grãos (ϵ_G) foi significativo ($p < 0,05$) nos estádios de perfilhamento, espigamento e enchimento de grãos, com redução de 21,1; 22,2 e 22,2 %, respectivamente, em relação à testemunha.
- Quando o estresse hídrico foi aplicado nas fases de perfilhamento, espigamento e enchimento de grãos, a produção de grãos foi reduzida em 29,7; 18,1 e 17,5%, respectivamente, em relação à testemunha.

- No caso da produção de fitomassa o estresse hídrico foi mais prejudicial ($P < 0,01$) quando foi aplicado durante o perfilhamento, cuja redução em relação à testemunha foi de 30,9%.

- Além da produção de fitomassa e de grãos, outros parâmetros agrônômicos, também afetados pelo estresse hídrico, em relação à testemunha foram: a) altura média de planta [perfilhamento (redução de 11,1%) e espigamento (redução de 4,7%)]; b) número de espigas por metro quadrado [perfilhamento (redução de 35,3%) e espigamento (redução de 16,9%)]; c) semente por espiga [perfilhamento (redução de 7,9%), espigamento (redução de 13,2%), enchimento de grãos (redução de 13,2%) e maturação (redução de 10,5%)]; d) peso de 1000 grãos (enchimento de grãos, redução de 13,6%); e) índice de colheita [enchimento de grãos (redução de 19,1%), maturação (redução de 7,9%)] e f) produção de proteína [perfilhamento (redução de 29,6%), espigamento (redução de 22,1%), enchimento de grãos (redução de 20,0)].

- A redução na produção de proteína, quando o estresse hídrico foi aplicado durante o perfilhamento, foi consequência da diminuição da produção de grãos e não da remobilização do nitrogênio estocado na planta para a semente.

- A germinação, o comprimento e a percentagem de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) no grão, não foram afetadas pelo estresse hídrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASE, J.K.; SIDDOWAY, F.H.; MILLARD, J.P. Spring wheat-leaf phytomass and yield estimates from airborne scanner and hand-held radiometer measurements.

International Journal of Remote Sensing, 5(5):771-781, May 1984.

AL-ABBAS, A. ; BARR, H. R. ; HALL, J. D. ; CRANE, F. L.; BAUMGARDNER, M F. Spectra of normal and nutrient deficient maize leaves. **Agronomy**

Journal, 66(1):16-20, Jan./Feb. 1974.

ASRAR, G.; FUCHS, M.; KANEMASU, E.T.; HATFIELD, J.L. Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. **Agronomy Journal**, 76(2):300-6, Mar./Abr. 1984.

ASRAR, G. ; KANEMASU, E. T. ; JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. Estimation of total above ground phytomass production using remote sensed data. **Remote Sensing of Environment**, 17(3):211-220, June, 1985.

ASRAR, G.; MYNENI, R.B.; KANEMASU, E.T. Estimation of plant-canopy attributes from spectral reflectance measurements. In: ASRAR, G., ed. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York, John Wiley & Sons, 1989. cap. 7, p. 252-96.

- ASRAR, G. ; MYNENI, R. B.; CHOUDHURY, B.J. Spatial heterogeneity in vegetation canopies and remote sensing of absorbed photosynthetically active radiation: a modeling study. **Remote Sensing of Environment**, **41**(2/3):85-103, Aug./Sept. 1992.
- ASSUNÇÃO, H. F. da. **Relações entre a radiação fotossinteticamente ativa e a radiação global em Piracicaba-SP**. Piracicaba, 1994. 57p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/ USP).
- ASSUNÇÃO, G.V. **Sensoriamento remoto na agricultura: conceitos básicos, metodologia e aplicações**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais- INPE, 1989 (INPE-4806-MD/39).
- BARET, F.; GUYOT, G.; MAJOR, D. J. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. **Photogrametria (PRS)**, **43** (5):241-56, June, 1989.
- BARET, F.; GUYOT, G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. **Remote Sensing of Environment**, **35**(2/3):161-73, Feb./Mar. 1991
- BARLOW, E. W. R. ; LEE, J.W. ; RANA, M.; SMART, M. G. Water relations of the developing wheat grain. **Australian Journal of Plant Physiology**, **7**(5):516-25, Oct. 1980
- BAUER, M.E. **The role of remote sensing in determining the distribution and yield of crops**, West Lafayette, Laboratory for Applications of Remote Sensing, 1975. (LARS Technical Report 122075).

BAUER, M.E. ; VANDERBILT, V.C. ; ROBINSO, B.F.; DAUGHTRY, S.T.

Spectral properties of agricultural crops and soils measured from space, aerial, field and laboratory sensors. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF PHOTOGRAMETRY, 14., Hamburg, 1980. **Proceedings**. Hamburg, West Germany, july 13-25, 1980. p 56 -73.

BAUER, M.E.; DAUGHTRY, C.S.T.; BIEHL, L.L.; KANEMASU, E.T.; HALL, F.G. Field spectroscopy of agricultural crops. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 24(1):65-75, Jan. 1986.

BOWMAN, W. D. The relationship between leaf water status, gas exchange, and spectral reflectance in cotton leaves. **Remote Sensing of Environment**, 30 (3):249-55, Dec. 1989.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 5 ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 1979. 647p.

BRAGA, H. J. **Caracterização da seca agronômica através de novo modelo de balanço hídrico, na região de Lagunas, litoral sul do Estado de Santa Catarina**. Piracicaba, SP, 1982. 157p. (Mestrado- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

CAMARGO, A. P. **Balanço hídrico do estado de São Paulo**. Campinas, Instituto Agrônômico de Campinas, 1964. 19 p. (Boletim, 116).

CAMARGO, A. P.; PINTO, H. S.; PEDRO JUNIOR, M. J.; ALFONSI, R. R.; ORTOLANI, A. A. Clima do estado de São Paulo. In: SAEESP. **Zoneamento Agrícola do Estado de São Paulo**, Instituto Agrônômico de Campinas, 1974. vl.

- CARTER, G.A. Primary and secondary effects of water content on the spectral reflectance of leaves. **American Journal of Botany**, 78 (7):916-24, July, 1991
- CELIS-CEUSTERS, A. M. Ground truth radiometry (EXOTECH) on bare and overgrown Belgian soils. **Pedologie**, 34:43-66, 1980
- CHEN, C. S.; TARDIN, A. T.; BATISTA, G. T. **Índices de vegetação e suas aplicações na agricultura**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, 1986. (INPE-3912-MD/030).
- CHOUDHURY, B.J. Relationships between vegetation indices, radiation and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis. **Remote Sensing of Environment**, 22(2):209-34, July, 1987.
- CLEVERS, J.G.P.W. The application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting for soil moisture. **Remote Sensing Environment**, 29(1):25-37, July, 1989.
- COLWELL, J.E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 3(3):175-83, 1974.
- COORDENADORIA DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA INTEGRAL. **Recomendação da comissão técnica de trigo para 1994**. Campinas, CATI, 1994. 74p. (Boletim, 216)
- DARNELL, J.; LODISH, H.; BALTIMORE, D. **Molecular cell biology**. New York, Scientific American Books, 1990. 1105p.
- DAUGHTRY, C. S. T. Direct measurements of canopy structure. **Remote Sensing Review**, 5(1):45-60, Nov. 1990.

- DAUGHTRY, C.S.T. ; VANDERBILT, V.C.; POLLARA, V.J. Variability of reflectance measurements with sensor altitude and canopy type. **Agronomy Journal**, **74**(4): 744-51, July/Aug. 1982.
- DAUGHTRY, C. S. T. ; GALLO, K. P.; BAUER, M. E. Spectral estimates of solar radiation intercepted by corn canopies. **Agronomy Journal**, **75**(3):527-31, May/June, 1983.
- DAUGHTRY, C. S. T. & HOLLINGER, S. E. Cost of measuring leaf area index of corn. **Agronomy Journal**, **76**(5):836-41, Sept./Oct. 1984.
- DAUGHTRY, C.S.T.; GALLO, K.P.; GOWARD, S.N.; PRINCE, S.D.; KUSTAS, W.P. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. **Remote Sensing of Environment**, **39**(2):141-52, Feb. 1992.
- DEERING, D.W. Field measurements of bidirectional reflectance. In: ASRAR, G., ed. **Theory and applications of optical remote sensing**. New York, John Wiley & Sons, 1989. cap.2, p.14 - 61.
- DEMETRIADES-SHAD, T. H. ; FUCHS, M. ; KANEMASU, E. T. ; FLITEROFT, I. A note of caution concerning the relationship between cumulated intercepted solar radiation and crop growth. **Agricultural and Forest and Meteorology**, **58**(3/4):193-207, Apr. 1992.
- DONALD, C.M. ; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereals as agronomic and plant breeding criteria. In: BRADY, N.C., ed. **Advances in Agronomy**. New York, Academic Press, 1976. v.8, p.361 - 407.

- DOOREMBOS, J. & KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193p. (FAO-Plant Production and Protection, paper, 33).
- EPIPHANIO, J.C.N. Metodologia de aquisição de dados ao nível terrestre. In: ASSUNÇÃO, G.V. **Sensoriamento remoto na agricultura; conceitos básicos, metodologia e aplicações**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, 1989. p.53-73 (INPE-4806-MD/39)
- FOLEGATTI, M. V. **Avaliação do desempenho de um “SCHEDULES” na detecção do estresse hídrico em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L) irrigada com diferentes lâminas**. Piracicaba, 1988. 188p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP).
- FORMAGGIO, A. R. **Características agronômicas e espectrais para sensoriamento remoto do trigo e feijão**. Piracicaba, 1989. 161p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP).
- FREITAS, J. G. de ; CARDOSO, A. A. ; SEDIYAMA, C. S. ; FERREIRA, P. A.; MOURA FILHO, W. Trigo; efeito de três faixas de umidade na evapotranspiração real e na produção de grãos e seus componentes. **Bragantia**, Campinas, **44** (2): 515-30, 1985.
- GALLAGHER, H. N.& BISCOE, P.V. Radiation absorption, growth and yield of cereals. **Journal of Agricultural Science**, **91**(1):47-60, Aug. 1978.
- GALLO, K.P.; DAUGHTRY, C.S.T.; BAUER, M.F. Spectral estimation in corn canopies. **Agronomy Journal**, **78**(5):752-56, Sept./Oct. 1985

- GALLO, K. P.; DAUGHTRY, C. S. T.; WIEGAND, C. L. Errors in measuring absorbed radiation and computing crop radiation use efficiency. **Agronomy Journal**, **85**(6):1222-1228, Nov./Dec. 1993.
- GARDNER, P.F.; PEARCE, R.B.; MITCHELL, R.L. **Physiology of crop plants**. Iowa, Iowa State University Press, 1985. 337p.
- GAUSMAN, H. W. & ALLEN, W. A. Optical parameters of leaves of 30 plant species. **Plant Physiology**, **52**(1):57-62, July 1973.
- GAUSMAN, H. W.; ESCOBAR, D.E.; RODRIGUEZ, R.R. Effect of stress and pubescence on plant leaf and canopy reflectance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING FOR OBSERVATION ; INVENTORY OF EARTH RESOURCES ; THE ENDANGERED ENVIRONMENT. **Proceedings**. Freiburg, F.R.G. 2-5 July, v.23. 1978. p.719-49.
- GLADWELL, D. R.; LETT, R. E.; LAWRENCE, P. Application of reflectance spectrometry to mineral exploration using portable radiometers. **Economic Geology**, **78**(4):699-710, June/July, 1983.
- GOSSE, G.; VARLET-GRANCHER, C.; BONHOMME, R.; CHARTIER, M.; ALLIR, J. M.; LEMAIRE, G. Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, **6**(1):47-56, 1986.
- GOWARD, S.N.; HUENNRICH, K.F. Vegetation canopy PAR absorptance and the normalized difference vegetation index: an assessment using the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, **39**(2):119-40, Feb. 1992.

- GREEN, C.F. Nitrogen nutrition and wheat growth in relation to absorbed solar radiation. **Agricultural and Forest and Meteorology**, **41**(3-4):207-48, Dec. 1987.
- GUYOT, G.; DUPONT, O.; JOANES, H.; PRIEUR, C.; HUET, M.; PODAIRE, A. Investigation into the mid-IR spectral and best suited to monitoring vegetation water content. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 18., Ann Arbor, ERIM, 1985. **Proceedings**. Ann Arbor, MI, ERIM, 1985. p.1049-63.
- GUYOT, G. Optical properties of vegetation canopies. In: STEVEN, M.D. & CLARK, J.A., ed. **Applications of remote sensing in agriculture**. London, Butterworths, 1990. cap. 2, p. 19-43.
- HATFIELD, D.L.; ASRAR, G. ; KANEMASU, E.T. Intercepted photosynthetically active radiation estimated by spectral reflectance. **Remote Sensing of Environment**, **14**(1/3):65-75, Jan. 1984.
- HATFIELD, D.L.; KANEMASU, E.T.; ASRAR, G.; JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, P.J.; REGINATO, R.J.; IDSO, S.B. Leaf area estimates from spectral measurements over various planting data of wheat. **International Journal Remote Sensing**, **6** (1): 167-75, Jan.1985.
- HIPPS, L. E.; ASRAR, G.; KANEMASU, E.T Assessing the interception of photosynthetically active radiation in winter wheat. **Agricultural and Meteorology**, **28** (3):253-9, Mar. 1983.
- HOFFER, R.M. Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensing data. In: SWAIN, P.H. & DAVIS, S. M., ed. **Remote sensing the quantitative approach**, New York, McGraw Hill, 1978. cap.5, p. 228-89.

HOFFER, R.M. & JOHANNSEN, C.J. Ecological potentials in espectral signature analysis. In: JOHNSON, P.L., ed. **Remote sensing in ecology**. Athens, University of Georgia Press, 1969. p. 1-16.

HORLER, D.N.H.; BARBER, J.; BARRINGER, A. R. Effect of heavy metals on the absorbance and reflectance spectra of plants. **International Journal of Remote Sensing**, 1(2):121-36, Apr./Jun. 1980.

HORLER, D.N.H.; DOCKRAY, M.; BARBER, J. The red edge of plant leaf reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, 4(2):273-88, Apr./June, 1983.

HUETE, A. R. & JACKSON, R. D. Suitability of spectral indices for evaluating vegetation characteristics on arid rangelands. **Remote Sensing of Environment**, 23:213-32, 1987

HUETE, A.R.& JACKSON, R.D. Soil and atmosphere influences on the spectra of partial canopies. **Remote Sensing of Environment**, 25 (1): 89-105, June, 1988.

HUNT, E.R. & ROCK, B.N. Detection of changes in leaf water content using near- and middle-infrared reflectance. **Remote Sensing of Environment**, 30 (1):43-54, Oct. 1989.

JACKSON, R.D.; PINTER JUNIOR, P.J.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. Wheat spectral reflectance: interations between crop configuration, sun elevation and azimuth angle. **Applied Optics**, 18(22):3730-31, Nov., 1979b.

JACKSON, R. D.; MORAN, M. S.; SLATER, P. N.; BIGGAR, S. F. Field calibration of reference reflectance panels. **Remote Sensing of Environment**, 22(1):145-58, June, 1987.

- JACKSON, R. D. & HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, **11**:185-200, 1991.
- KINIRY, J. R. Nonstructural carbohydrate utilization by wheat shaded during grain growth. **Agronomy Journal**, **85**(4):844-9, July/Aug., 1993.
- KIRKHAN, M.B. & KANEMASU, E.T. Wheat In: TEARE, I.D. & PEET, M.M., ed. **Crop-water relations**. New York, John Wiley & Sons, 1983. cap.15, p. 483-520.
- KNIPLING, E.B. Physical and physiological bases for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, **1**(3): 155-9, 1970.
- KOBATA, T.; PALTA, J. A.; TURNER, N. C. Rate of development of postanthesis water deficits and grain filling of spring wheat. **Crop Science**, **32**(5):1238- 48, Sept./Oct. 1992.
- KOLLENKARK, J. C.; VANDERBILT, V. C.; BAUER, M. E.; HOUSLEY, T. L. Effect of cultural practices on agronomic and reflectance characteristics of soybean canopy. **Agronomy Journal**, **74**(4):751-8, July/Aug. 1982.
- KUMAR, M. & MONTEITH, H.L. Remote sensing of crop growth. In: **Plants and Daylight Spectrum**. New York, H. Smith, 1981. p.133-44.
- LAUTENSCHTAGER, L. F. & PERRY JUNIOR, C. R. Jr. Comparison of vegetation indices based on satellite-acquired data. In: SURVEY RESEARCH METHODS section of the American Statistical Association. **Proceedings**. p 77-82. 1981.

LEBLON, B.; GUERIF, M.; BARET, F. The use of remotely sensed data in estimation of PAR use efficiency and biomass production of flooded rice.

Remote Sensing of Environment, 38(2):147-58, Nov. 1991.

LEMONS, R. C. & SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2. ed. Campinas, SBCS/SNLCS, 1982. 45p.

MACHADO, E. C. Eficiência fotossintética. In: SEMINÁRIO DE BIOTECNOLOGIA AGRÍCOLA, Piracicaba, 1985. **Anais**. Piracicaba, FEALQ, 1985. p 175-200.

MARIA, J.; FREITAS, J.G. Anatomia do caule e da raiz de três cultivares de trigo (*Triticum aestivum*, L.) sob déficit hídrico. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 33., Maceió, 1982. Resumos. p.57.

MECKEL, L.; EGLI, D. B.; PHILLIPS, R. E.; RADCLIFFE, D.; LEGGETT, J. E. Effect of moisture stress on grow seed in soybeans. **Agronomy Journal**, 76 (4):647-50, July/Aug. 1984.

MILTON, E. J. Field measurement of reflectance factors: a further note. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 48(9):1474-6, Sept. 1982.

MILTON, E. J. Principles of field spectroscopy. **International Journal Remote Sensing**, 8(12):1807-27, Dec. 1987.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal Applied Ecology**, 9:747-66, 1972.

MONTEITH, J.L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Phil. Trans. Roy. London** B281:277-294. 1977.

- MYERS, V. I. Soil, water, plant relationships. In: **Remote Sensing With Spectral Reference to Agriculture and Forestry**. Washington, National Academy of Science, 1970. p.253-79.
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, Ceres, 1989. 440p.
- OOSTERHUIS, D. M.& CARTWRIGHT, P.M. Spike differentiation and floret survival in semidwarf spring wheat as affected by water stress and photoperiod. **Crop Science**, 23(4):711-7, July/Aug. 1983
- PALTA, J. A.; KOBATA, T.; TURNER, N. C.; FILLERY, I. R. Remobilization of carbon and nitrogen in wheat as influenced by postanthesis water deficits. **Crop Science**, 34(1):118-24, Jan./Feb. 1994.
- PEARSON R.L. & MILLER, R.D. Remote mapping of starting crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie, Pawnee National Grassland, Colorado. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 8., Ann Arbor, 2-6 Oct. 1972. **Proceedings**. Ann Arbor, ERIM, 1972. v.2, p. 1355-73.
- PINTER JUNIOR., P.J.; JACKSON, R.D.; EZRA, C.E.; GAUSMAN, H.W. Sun-angle and canopy-architecture effects on the spectral reflectance of six wheat cultivars. **International Journal of Remote Sensing**, 6(12):1813-25, Dec. 1985.
- PRICE, J. C. Estimating vegetation amount from visible and near infrared reflectances. **Remote Sensing of Environment**, 41(1):29-34, July, 1992.
- PRINCE, S. D. A model of regional primary production for use with coarse-resolution satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, 12(6):1313-30, June, 1991.

RANZANI, G. A marcha anual d'água disponível no solo. **O Solo**, 64:57-68. 1972.

RANZANI, G.; FREIRE, O.; KINJO, T. **Carta de solo do município de Piracicaba**. Piracicaba, Centro de Estudos de Solos, ESALQ/USP, 1966. 85p.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1993. 505p.

RICHARDSON, A. J.; WIEGANDAND; C.L.; GAUSMAN, H.W.; CUELLAR, J.A.; GERBERMANN, A.H. Plant, soil and shadow reflectance components of row crops. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 41(11): 1401-7, Nov. 1975.

RICHARDSON, A. J. & WIEGANDAND, C. L. Distinguishing vegetation from soil background information. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 43(12): 1541-52, Dec. 1977.

RIPPLE, W.J. Spectral reflectance relationships to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 52(10):1669-75, Oct. 1985.

RUDORFF, B.F.T.; MULCHI, C.L.; DAUGHTRY, C.S.T.; LEE, E.H. Growth, radiation use efficiency, and canopy reflectance of wheat and corn grown under elevated ozone and carbon dioxide atmospheres. **Remote Sensing of Environment**, 55 (2): 163-73, Feb. 1996

RUDORFF, B.F.T. and BATISTA, G. T. Spectral response of wheat and its relationship to agronomic variables in tropical region. **Remote sensing of Environment**, 31(1): 53-63. 1990.

- SCHEEREN, P. L. **Informações sobre o trigo**. Passo Fundo, EMBRAPA/CNPT, 1986. 33p.
- SELLER, P.J. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. **International Journal of Remote Sensing**, 6(8):1335-72, Aug. 1985.
- SEPASKHAH, A.R. & BOERSMA, L. Shoot and root growth of wheat seedlings exposed to several levels of matric potential and NaCl-induced osmotic potential soil water. **Agronomy Journal**, 71(5): 746-52, 1979.
- SHIMSHI, D. & KAFKAFI, U. The effect of supplemental irrigation and nitrogen fertilization on wheat (*Triticum aestivum*, L). **Irrigation Science**, 1:27-38, 1978.
- SHULTIS, J. K. Calculated sensitivities of several optical radiometric indices for vegetation canopies. **Remote Sensing of Environment**, 38(3):211-28, Dec. 1991.
- SINCLAIR, T. R. & HORIE, T. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency: a review. **Crop Science**, 29(1):90-8, Jan./ Feb. 1989.
- SILVA, L. R.; HOFFER, R. M.; CIPRA, J. Extended wavelength field spectroradiometry. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 7., Ann Arbor, 1971. **Proceedings**. Ann Arbor, ERIM, 1971. p.1509-18.
- SLATER, N. P. The interaction of electromagnetic radiation with the Earth's surface. In: SLATER, N.P., ed. **Remote Sensing Optics and Optical System**. Massachusseter, Addison-Wesley Publishing Company, 1980. cap. 9, p 226-86.

SOAVE, D. & FREITAS, J.G. de Eficiência e resposta de genótipos de trigo a doses de nitrogênio em relação ao teor e a quantidade de proteína bruta. **Agricultura**, 71(1): 135-44 1996. Piracicaba, SP.

SPAROVEK, G.; LEPSCH, I. F.; TORRADO, P. VP.; MODOLO, L. C.; PASSOS, H. R.; VAZ, L. F. A.; BARBOSA, R. G. **Avaliação das terras do câmpus "Luiz de Queiroz"**. Piracicaba, ESALQ/USP, 1993. 28p.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEMS INSTITUTE INCORPORATION
SAS/ATAT **Guide for Personal Computers**, version 6 ed. SAS Institute Inc., Cary, NC, 378p 1985.

STEEL, R.G.D. & TORRIE, J.H. Principles and procedures of statistics. A **Biometrical Approach**. Ney York, McGraw-Hill, 1980. p 172-7.

STEFFEN, C. A. **Reflectância**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, 1995. (INPE 5638. PUD/070).

STEFFEN, C.A. Técnicas radiométricas com o spectron SE-590. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 1., Salvador, 1996. **Anais**. INPE, 1996. p. 9-14.

STEVEN, M.D.; BISCOE, P.V.; JAGGARD, K.W. Estimation of sugar beet production from reflection in the red and infrared spectral bands. **International Journal of Remote Sensing**, 4(2):325-34, Apr./June, 1983.

SZEICZ, G. Solar radiation for plant growth. **The Journal of Applied Ecology**, 2(2): 617-36, Aug. 1974.

TAIZ, L. & ZEIGER, E. **Plant physiology**. California, Benjamin/Cummings, 1991. 559p.

THOMAS, J.R.; NAMKEN, L.N.; OERTHER, G.F.; BROWN, R.G. Estimating leaf water content by reflectance measurements. **Agronomy Journal**, 63(6): 845-7, Nov./Dec. 1971.

THORNTHWAITE, C. W. & MATHER, J.R. The water balance. Centerton, New Jersey, Drexel Institute of Technology. In: **Climatology**, Elmer, 8., 1955. 104p.

TUBELIS, A. & NASCIMENTO, F. J. L. do. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo, Nobel, 1980. 374p.

TUCKER, C.L. & GARRATT, M.W. Leaf optical system modeled as stochastic process. **Applied Optical**, 16(3):635-42, Mar. 1977.

TUCKER, C. L. Hand-held radiometer studies of vegetation in-situ: a new ; promissing approach In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING FOR OBSERVATION AND INVENTORY OF EARTH RESOUCES ANDTHE ENDANGERED ENVIRONMENT, 7., Freiburg, 1978. **Proceedings**. Germany, G. Hildebr;t ; H. J. Boehnel, 1978. p.667-72.

TUCKER, C.L. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetations. **Remote Sensing of Environment**, 8(2):127-50, May. 1979.

TUCKER, C. J.; ELGIN, J. H.; McMURTREY, J. M. Relationships of crop radiance to alfafa agronomic values. **International Journal of Remote Sensing**, 1(1): 69-75, Jan./Mar. 1980.

TUCKER, C.L.; VANPRAET, C.; SHARMAN, M.L.; ITTERSUM, G. van. Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in senegalese Sahel: 1980-1984. **Remote Sensing of Environment**, 17(3):233-49, Jun. 1985.

UNSWORTH, M. H. ; LESSER, V. M.; HEAGLE, A. S. Radiation interception and the growth of soybeans exposed to ozone in open-top field chambers. **Journal Applied Ecology**, **21**(3):1059-79, Dec. 1984.

VANDERBILT, V.C.& GRANT, L. Ligth polarization measurements: a method to determine the specular and difuse lighth scattering properties of both leaves and plant canopies. In: COLLOQUIAL INTERNATIONAL SIGNATURE SPECTRALES D'OBJECTS EN TÉLÉDÉTECTION. 2., Bordeaux, **Proceedings**. 1983.

VANE, G. & GOETZ, A.F.H. Terrestrial imaging spectrometry. **Remote Sensing of Environment**, **24** : 1-29, 1988.

VYGODSKAYA, N. N.; GORSHKOVA, I.; FADEYEVA, Y.V. Theoretical estimates of sensitivity in some vegetation indices to variation in the canopy condition. **International Journal of Remote Sensing**, **10**(12):1857-72, Dec. 1989.

WANJURA, D.F.& HATFIELD, J.L. Sensitivity of spectral vegetative indices to crop biomass. **Transaction of the ASAE**, **30**(3): 810-6. May/June, 1987.

WESTGATE, M. E. & BOYER, J. S. Reproduction at how silk and pollen water-potentials in maize. **Crop Science**, **26**(4):951-6, July/Aug. 1986.

WESTGATE, M. E.& PETERSON, C. M. Flower and pod development in water-deficient soybeans (*Glycine max*, L. Merr.). **Journal of Experimental Botany**, **44**(258):109-17, Jan. 1993.

- WIEGAND, C.L.; GAUSMAN, H.W.; CUELLAR, J.A.; GERBERMAN, A.H.; RICHARDSON, A.J. Vegetation density as deduced from ERTS-1 MSS response. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., Washington, **Proceedings**. Washington, DC, v.1, 1974. p. 93-116.
- WIEGAND, C.L.; RICHARDSON, A.J.; KANEMASU, E.T. Leaf area index estimates for wheat from Landsat and their implications for evapotranspirations and crop modeling. **Agronomy Journal**, **71**(2):336-42, Mar./Abr. 1979.
- WIEGAND, C.L. & CUELLAR, J.A. Duration of grain filling and kernel weight of wheat as affected by temperature. **Crop Science**, **21**:95-101, Jan./Feb. 1981.
- WIEGAND, C.L. & RICHARDSON, A.J. Spectral component analysis rationale, and results for three crops. **International Journal of Remote Sensing**, **8**(7):1011-32, July, 1987.
- WIEGAND, C. L. & RICHARDSON, A. J. Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration, and yield: I. rationale. **Agronomy Journal**, **82**(3):623-29, May/Jun. 1990.
- WIEGAND, G. L.; RICHARDSON, A. J.; ESCOBAR, D. E. Vegetation indices in crop assessment. **Remote Sensing of Environment**, **35**(2):105-19, Feb. 1991.
- WOOLLEY, J.T. Reflectance and transmittance of light by leaves. **Plant Physiology** **47**(1/6):656-62, May, 1971.

APÊNDICE A

LEGENDA DA ESCALA FEEKS E LARGE PARA A CULTURA DO TRIGO

TABELA A.1 - Legenda da escala Feekes e Large para a cultura do trigo (Scheeren, 1986)

Código	Estádio fenológico
1	Plantas recém-emergidas, com uma ou mais folhas.
2	início do afilhamento
3	Afilhos formados. Folhas freqüentemente enroladas em espiral.
4	Início do aparecimento do pseudo-caule.
5	Pseudo-caule fortemente desenvolvido
6	Primeiro nó do colmo visível na base da gema
7	Segundo nó do colmo já formado
8	Folha bandeira visível, mas ainda enrolada. Início do emborrachamento.
9	Lígula da folha bandeira já visível
10	Bainha da folha bandeira completamente desenvolvida, mas as espigas ainda não visíveis.
10.1	Primeiras espigas visíveis.
10.2	Um quarto do processo de espigamento completo.
10.3	Metade do processo de espigamento completo.
10.4	Três quartos do processo de espigamento completo.
10.5	Todas as espigas fora da bainha.
10.5.1.	Começo do florescimento.
10.5.2.	Florescimento completo na parte apical da espiga
10.5.3.	Florescimento completo na parte basal da espiga
10.5.4	Final do florescimento, grãos no estágio aquoso
11.1	Grãos no estágio leitoso.
11.2	Grãos no estágio de massa.
11.3	Grãos duros (difíceis de serem rompidos com a unha)
11.4	Maduração até a colheita. Palhas secas.

APÊNDICE B

TRANSFORMAÇÃO DA RADIAÇÃO GLOBAL EM MJ m⁻² d⁻¹

QUADRO B.1 - Transformação da radiação global em MJ m⁻² d⁻¹

a) **Transformar cal cm⁻² d⁻¹ ⇒ MJ m⁻² d⁻¹**

Para mostrar como foi feita esta transformação, tomaram-se como exemplos os dados da radiação global (Rg) do dia 12 de junho de 1995, que foi de 291 cal cm⁻² d⁻¹. Além disso, a duração média do dia, para o mês de junho foi de 10,8 h, ou seja, 648 minutos ou ainda 38.880 segundos.

Tem-se então:

$$291 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1} / 648 \text{ min} = 0,45 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$$

Sabe-se que:

$$1,433 \cdot 10^{-3} \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} = 1 \text{ W m}^{-2}$$

$$0,45 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} = X (\text{W m}^{-2})$$

Logo

$$X (\text{W m}^{-2}) = \frac{0,45 \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \cdot 1 \text{ W m}^{-2}}{1,433 \cdot 10^{-3} \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}} = 314,03 \text{ W m}^{-2}$$

Porém,

$$1 \text{ W m}^{-2} = 1 \text{ J m}^{-2} \text{ S}^{-1}$$

Assim, multiplicando 314,03 por 38.880 segundos, tem-se que :

$$X = 12.209.486,40 \text{ J m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ ou } 12,209 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$$

b) **Transformar W m⁻² ⇒ MJ m⁻² d⁻¹**

$$\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} = \frac{\text{Rg (W m}^{-2}) \cdot \text{Comprimento do dia} \cdot 60 \text{ s}}{1.000.000}$$

APÊNDICE C

**BALANÇO DA ÁGUA NO SOLO E CARACTERIZAÇÃO DOS DIAS
“SECOS”**

Tabela C.1 - Balanço Hídrico Modificado (BHM) para caracterização dos dias “secos” no Período de 12/06 a 10/07. (tratamento 2).

N	Dia Juliano	Pr/I mm	Kc	ETm mm/dia	Pr-ETm mm	P	ADE mm	AC mm	N ** mm	Armazenamento		ETr mm/dia
										valor	alter.	
1	163	0,0	0,38	0,85	- 0,85	0,88	15,55	2,18	0,00	17,67	- 0,85	0,85
2	164	0,0	0,40	0,82	- 0,82	0,88	15,55	2,12	0,83	16,85	- 0,82	0,82
3	165	0,0	0,41	1,12	- 1,12	0,85	15,02	2,67	0,94	16,73	- 1,12	1,12
4	166	0,0	0,43	1,08	- 1,08	0,85	15,02	2,60	3,03	14,64	- 1,08	1,08
5	167	0,0	0,44	1,26	- 1,26	0,84	14,67	2,91	4,29	13,38	- 1,26	1,26
6	168	0,0	0,46	0,19	- 0,19	0,95	16,79	0,92	4,48	13,19	- 0,19	0,19
7	169	0,0	0,47	0,40	- 0,40	0,93	16,26	1,32	4,87	12,80	- 0,40	0,40
8	170	0,0	0,49	0,87	- 0,87	0,87	15,37	2,22	5,74	11,93	- 0,87	0,87
9	171	0,0	0,50	1,28	- 1,28	0,83	14,49	2,94	7,02	10,65	- 1,28	1,28
10	172	0,0	0,52	0,72	- 0,72	0,89	15,55	1,93	7,74	9,93	- 0,72	0,72
11	173	0,0	0,53	0,96	- 0,96	0,87	15,20	2,37	8,71	8,96	- 0,96	0,96
12	174	0,0	0,55	1,29	- 1,29	0,83	14,49	2,97	10,00	7,67	- 1,29	1,29
13	175	0,0	0,56	1,56	- 1,56	0,81	13,96	3,43	11,55	6,12	- 1,56	1,56
14	176	0,0	0,58	1,06	- 1,06	0,86	14,84	2,56	12,61	5,06	- 1,06	1,06
15	177	0,0	0,59	1,25	- 1,25	0,84	14,77	2,90	13,86	3,81	- 1,25	1,25
16	178	0,0	0,61	1,39	- 1,39	0,82	14,53	3,14	33,20	3,02	- 0,75	0,75
17	179	0,0	0,62	1,58	- 1,58	0,80	14,21	3,46	33,24	3,01	- 0,01	0,01
18	180*	0,0	0,64	1,33	- 1,33	0,83	14,63	3,04	36,60	2,52	- 0,49	0,49
19	181*	0,0	0,65	1,46	- 1,46	0,82	13,25	3,26	36,96	2,47	- 0,05	0,05
20	182*	0,0	0,67	1,64	- 1,64	0,80	13,61	3,56	37,25	2,43	- 0,04	0,04
21	183*	0,0	0,68	1,65	- 1,65	0,80	13,61	3,58	38,81	2,24	- 0,19	0,19
22	184*	0,0	0,70	1,89	- 1,89	0,77	13,08	3,97	39,15	2,20	- 0,04	0,04
23	185*	0,0	0,71	2,14	- 2,14	0,75	12,72	4,37	39,90	2,11	- 0,09	0,09
24	186*	0,0	0,73	1,81	- 1,81	0,78	13,43	3,84	43,59	1,74	- 0,37	0,37
25	187*	0,0	0,74	2,18	- 2,18	0,75	13,24	4,43	43,69	1,73	- 0,01	0,01
26	188*	0,0	0,76	2,27	- 2,27	0,74	13,10	4,57	45,51	1,57	- 0,16	0,16
27	189*	0,0	0,77	0,79	- 0,79	0,88	15,61	2,06	58,75	0,77	- 0,80	0,80
28	190*	0,0	0,79	0,67	- 0,67	0,90	15,83	1,84	61,32	0,68	- 0,09	0,09
29	191*	0,0	0,80	0,59	- 0,59	0,90	15,97	1,70	63,28	0,61	- 0,07	0,07

* Dias “secos” $AC = (1 - 0,84) \times 17,67 = 2,83 \text{ mm}$

** N para os dias não seco (até o dia 177) e N_T para dias seco (a partir do dia 178)

Tabela C.2 - Balanço Hídrico Modificado (BHM) para caracterização dos dias “secos” no período de 10/07 a 09/08 (tratamento 3).

N	Dia Juliano	Pr/I mm	Kc	ETm mm/dia	Pr-ETm mm	P	ADE mm	AC mm	N ** mm	Armazenamento		ETr mm/dia
										----- valor	alter.	
1	191	0,0	0,80	1,02	-1,02	0,86	15,18	2,49	0,00	17,67	-1,02	1,02
2	192	0,0	0,82	1,64	- 1,64	0,80	14,10	3,57	1,64	16,03	- 1,64	1,64
3	193	0,0	0,83	2,10	- 2,10	0,76	13,37	4,30	3,74	13,93	- 2,10	2,10
4	194	0,0	0,85	1,26	- 1,26	0,84	14,76	2,91	4,99	12,68	- 1,26	1,26
5	195	0,0	0,86	3,05	- 3,05	0,68	11,94	5,73	8,04	9,63	- 3,05	3,05
6	196	0,0	0,88	1,57	- 1,57	0,81	14,23	3,44	9,61	8,06	- 1,57	1,57
7	197	0,0	0,89	2,06	- 2,06	0,76	13,43	4,24	11,67	6,00	- 2,06	2,06
8	198 *	0,0	0,91	2,37	- 2,37	0,73	12,94	4,73	25,86	4,46	- 1,54	1,54
9	199 *	0,0	0,92	2,75	- 2,75	0,70	12,37	5,30	27,04	4,19	- 0,27	0,27
10	200 *	0,0	0,94	2,80	- 2,80	0,70	12,30	5,37	29,66	3,64	- 0,55	1,55
11	201 *	0,0	0,95	1,78	- 1,78	0,79	13,87	3,80	36,39	2,55	- 1,09	1,09
12	202 *	0,0	0,97	1,72	- 1,72	0,79	13,97	3,70	38,50	2,28	- 0,27	0,27
13	203 *	0,0	0,98	1,83	- 1,83	0,78	13,79	3,88	39,62	2,14	- 0,14	0,14
14	204 *	0,0	1,00	2,11	- 2,11	0,75	13,34	4,33	40,12	2,09	- 0,05	0,05
15	205 *	0,0	1,01	2,58	- 2,58	0,71	12,63	5,04	40,55	2,04	- 0,05	0,05
16	206 *	0,0	1,03	3,45	- 3,45	0,64	11,39	6,28	41,11	1,98	- 0,06	0,06
17	207 *	0,0	1,04	3,29	- 3,29	0,66	11,61	6,06	44,85	1,62	- 0,36	0,36
18	208 *	0,0	1,05	3,03	- 3,03	0,68	11,97	5,70	48,68	1,32	- 0,30	0,30
19	209 *	0,0	1,05	4,83	- 4,83	0,55	9,67	8,00	49,43	1,27	- 0,05	0,05
20	210 *	0,0	1,05	3,62	- 3,62	0,63	11,16	6,51	55,43	0,92	- 0,35	0,35
21	211 *	0,0	1,05	2,41	- 2,41	0,75	13,29	4,38	61,88	0,66	- 0,26	0,26
22	212 *	0,0	1,05	3,12	- 3,12	0,64	11,30	6,37	62,35	0,64	- 0,02	0,02
23	213 *	0,0	1,05	4,02	- 4,02	0,60	10,65	7,02	64,07	0,58	- 0,06	0,06
24	214 *	0,0	1,05	2,47	- 2,47	0,72	12,78	4,89	67,94	0,48	- 0,10	0,10
25	215 *	0,0	1,05	3,78	- 3,78	0,62	10,95	6,72	75,38	0,32	- 0,16	0,16
26	216 *	0,0	1,05	2,05	- 2,05	0,76	13,44	4,23	83,27	0,21	- 0,11	0,11
27	217 *	0,0	1,05	2,32	- 2,32	0,74	13,02	4,65	84,21	0,20	- 0,01	0,01
28	218 *	0,0	1,05	2,68	- 2,68	0,71	12,48	5,19	85,37	0,19	- 0,01	0,01
29	219 *	0,0	1,05	3,71	- 3,71	0,62	11,04	6,63	85,93	0,18	- 0,01	0,01
30	220 *	0,0	1,05	4,11	- 4,11	0,60	10,53	7,14	89,16	0,15	- 0,03	0,03
31	221 *	0,0	1,05	4,01	- 4,01	0,60	10,66	7,01	93,38	0,12	- 0,03	0,03

* Dias “secos” $AC = (1 - 0,71) \times 17,67 = 5,12 \text{ mm}$

** N para os dias não seco (até o dia 197) e N_T para os dias seco (a partir do dia 198)

Tabela C.3 - Balanço Hídrico Modificado (BHM) para caracterização dos dias “secos” no período de 07/08 a 23/08 (tratamento 4).

N	Dia	Pr/I	Kc	ETm	Pr-ETm	P	ADE	AC	N **	Armazenamento		ETr
		mm		mm/dia	mm		mm	mm		valor	alter.	
1	219	0,0	1,05	3,61	- 3,61	0,63	11,18	6,49	0,00	17,67	- 3,39	3,39
2	220	0,0	1,05	3,71	- 3,71	0,62	11,04	6,63	3,71	13,96	- 3,71	3,71
3	221	0,0	1,05	4,11	- 4,11	0,60	10,53	7,14	7,82	9,85	- 4,11	4,11
4	222	0,0	1,05	4,01	- 4,01	0,60	10,66	7,01	18,54	6,59	- 3,26	3,26
5	223 *	0,0	1,05	4,48	- 4,48	0,57	10,08	7,59	22,11	5,45	- 1,41	1,41
6	224 *	0,0	1,05	4,05	- 4,05	0,60	10,61	7,06	26,98	4,20	- 1,25	1,25
7	225 *	0,0	1,05	4,07	- 4,07	0,60	10,58	7,09	31,01	3,39	- 0,81	0,81
8	226 *	0,0	1,05	4,40	- 4,40	0,58	10,18	7,49	34,77	2,78	- 0,61	0,61
9	227 *	0,0	1,05	4,75	- 4,75	0,55	9,76	7,91	38,92	2,23	- 0,55	0,55
10	228 *	0,0	0,70	1,96	- 1,96	0,77	13,58	4,09	49,46	1,27	- 0,96	0,96
11	229 *	0,0	0,70	2,32	- 2,32	0,74	13,02	4,65	49,90	1,24	- 0,03	0,03
12	230 *	0,0	0,70	2,98	- 2,98	0,68	12,05	5,62	50,29	1,22	- 0,02	0,02
13	231 *	0,0	0,70	2,82	- 2,82	0,69	12,26	5,41	53,64	1,02	- 0,20	0,20
14	232 *	0,0	0,70	2,67	- 2,67	0,71	12,49	5,18	56,89	0,86	- 0,16	0,16
15	233 *	0,0	0,70	2,48	- 2,48	0,72	12,78	4,89	60,15	0,72	- 0,14	0,14
16	234 *	0,0	0,70	2,26	- 2,26	0,74	13,11	4,56	63,38	0,61	- 0,11	0,11
17	235 *	0,0	0,70	2,94	- 2,94	0,68	12,10	5,57	63,57	0,60	- 0,01	0,01

* Dias “secos” $AC = (1 - 0,65) \times 17,67 = 6,18 \text{ mm}$

** N para os dias não secos (até o dia 222) e N_T para os dias secos (a partir do dia 223)

Tabela C.4 - Balanço Hídrico Modificado (BHM) para caracterização dos dias “secos” no período de 23/08 a 06/09 (tratamento 5).

N	Dia Juliano	Pr/I mm	Kc	ETm mm/dia	Pr-ETm mm/dia	P	ADE mm	AC mm	N ** mm	Armazenamento		ETr mm/dia
										valor	alter.	
1	235	0,0	0,70	2,94	- 2,94	0,68	12,10	5,57	0,00	17,67	- 2,94	2,94
2	236	0,0	0,70	3,09	- 3,09	0,67	11,89	5,78	3,09	14,58	- 3,09	3,09
3	237	0,0	0,70	3,10	- 3,10	0,67	11,87	5,80	6,18	11,49	- 3,10	3,10
4	238	0,0	0,70	2,91	- 2,91	0,69	12,14	5,53	9,09	8,58	- 2,91	2,91
5	239	0,0	0,25	1,14	- 1,14	0,85	14,97	2,70	10,23	7,44	- 1,14	1,14
6	240	0,0	0,25	0,68	- 0,68	0,89	15,81	1,86	10,91	6,76	- 0,68	0,68
7	241	0,0	0,25	1,15	- 1,15	0,85	14,96	2,71	12,06	5,61	- 1,15	1,15
8	242	0,0	0,25	1,29	- 1,29	0,83	14,70	2,97	13,35	4,32	- 1,29	1,29
9	243 *	0,0	0,25	1,14	- 1,14	0,85	14,97	2,70	34,83	3,18	- 1,14	1,14
10	244 *	0,0	0,25	1,24	- 1,24	0,84	14,80	2,87	35,05	2,74	- 0,44	0,44
11	245 *	0,0	0,25	1,15	- 1,15	0,85	14,95	2,72	37,07	2,46	- 0,28	0,28
12	246 *	0,0	0,25	1,05	- 1,05	0,86	15,13	2,54	39,23	2,19	- 0,27	0,27
13	247 *	0,0	0,25	1,13	- 1,13	0,85	14,99	2,68	39,52	2,16	- 0,03	0,03
14	248 *	0,0	0,25	1,23	- 1,23	0,84	14,81	2,86	39,66	2,14	- 0,02	0,02
15	249 *	0,0	0,25	1,18	- 1,18	0,84	14,90	2,77	41,35	1,96	- 0,18	0,18

* Dias “secos” $AC = (1 - 0,80) \times 17,67 = 3,53$

** N para os dias não seco (até o dia 242) e N_T para os dias secos (a partir do dia 243)

APÊNDICE D

RESULTADOS DO TESTE t PARA PARES DE OBSERVAÇÕES

Tabela D.1 - Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t $|t|$ e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM_3 , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamentos 1 e 2).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor $ t $	$p > t $	N.S.
174	- 0,41	0,5487	0,1826	2,25	0,054	ns
178	- 0,03	0,2646	0,0881	0,38	0,715	ns
179	- 0,07	0,2449	0,0816	0,82	0,437	ns
182	- 0,24	0,7715	0,2572	0,95	0,369	ns
184	- 0,00	0,3708	0,1236	0,00	1,000	ns
185	- 0,72	0,6796	0,2265	3,18	0,013	*
186	- 0,34	0,8172	0,2724	1,26	0,242	ns
194	- 0,60	0,5727	0,2338	2,57	0,050	*
195	- 0,72	0,4665	0,1905	3,76	0,013	*
198	- 0,23	0,5428	0,2216	1,05	0,341	ns
202	- 0,25	0,2738	0,1118	2,24	0,075	ns
204	- 0,35	0,1871	0,0763	4,58	0,006	**
205	0,00	0,4664	0,1554	0,00	1,000	ns
206	- 0,02	0,5044	0,1681	0,13	0,898	ns
207	- 0,01	0,4196	0,1398	0,08	0,938	ns
208	- 0,02	0,3597	0,1199	0,18	0,857	ns
210	0,05	0,2554	0,0852	0,65	0,532	ns
211	0,00	0,2236	0,0745	0,00	1,000	ns
213	0,05	0,0538	0,1795	0,30	0,765	ns
219	- 0,19	0,5395	0,1798	1,05	0,324	ns
220	- 0,11	0,4456	0,1485	0,74	0,476	ns
221	- 0,21	0,2619	0,0873	2,42	0,042	*
222	- 0,33	0,2738	0,0913	3,65	0,006	**
224	- 0,34	0,5592	0,1864	1,85	0,102	ns
225	- 0,29	0,4044	0,1348	2,14	0,064	ns
228	- 0,37	0,6873	0,2291	1,60	0,148	ns
229	- 0,03	0,6519	0,2173	0,15	0,882	ns
232	- 0,14	0,5102	0,1700	0,84	0,420	ns
234	- 0,28	0,5890	0,1963	1,41	0,195	ns
236	- 0,19	0,4622	0,1541	1,22	0,255	ns
239	- 0,12	0,5607	0,1869	0,65	0,531	ns
240	0,23	0,4769	0,1589	1,46	0,180	ns
241	0,16	0,6328	0,2243	0,69	0,507	ns
242	- 1, 00	1,7320	0,5774	1,73	0,121	ns
243	0,54	0,3282	0,1094	4,97	0,001	**
244	1,07	1,0932	0,3644	2,92	0,019	*
245	- 0,19	1,1504	0,3835	0,49	0,635	ns
247	0,71	1,2781	0,4260	1,67	0,133	ns

Tabela D.2 - Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t $|t|$ e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM₄, do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratmentos 1 e 2).

Dia Juliano	d ⁽¹⁾	σ_d ⁽²⁾	EPM ⁽³⁾	Valor t	p > t ⁽⁴⁾	N.S. ⁽⁵⁾
174	- 1,92	1,1819	0,3939	4,87	0,001	**
178	- 1,13	1,8384	0,6128	1,84	0,101	ns
179	- 0,27	1,2175	0,4058	0,65	0,529	ns
182	1,91	1,8079	0,6026	3,17	0,013	*
184	3,00	4,0071	1,3357	2,25	0,054	ns
185	2,20	8,2746	2,7582	0,79	0,448	ns
186	5,87	7,1414	2,3804	2,47	0,038	*
194	3,98	4,1787	1,7059	2,33	0,066	ns
195	3,50	7,5477	3,0813	1,13	0,307	ns
198	4,40	5,3130	2,1690	2,03	0,098	ns
202	7,97	5,0456	2,0598	3,87	0,012	*
204	- 2,55	11,4742	4,6843	0,54	0,609	ns
205	9,55	6,5000	2,1672	4,41	0,002	**
206	8,53	6,8308	2,2769	3,74	0,006	**
207	2,21	13,0270	4,3423	0,50	0,624	ns
208	7,13	5,2697	1,7565	4,06	0,004	**
210	7,90	5,9273	1,9757	3,99	0,004	**
211	7,79	5,9448	1,9816	3,93	0,004	**
213	10,24	9,3545	3,1181	3,28	0,011	*
219	7,89	6,0659	2,0219	3,90	0,004	**
220	7,49	4,8637	1,6212	4,62	0,002	**
221	6,04	6,3164	2,1055	2,87	0,021	*
222	3,78	6,7658	2,2552	1,67	0,132	ns
224	6,28	7,8076	2,6025	2,41	0,042	*
225	4,94	5,8487	1,9495	2,54	0,035	*
228	5,26	4,0444	1,3481	3,90	0,005	**
229	6,57	5,7736	1,9245	3,41	0,009	**
232	6,97	3,7060	1,2353	5,65	0,001	**
234	4,97	3,9903	1,3301	3,73	0,006	**
236	4,91	4,4557	1,4852	3,31	0,011	*
239	4,84	4,5555	1,5185	3,19	0,013	*
240	5,41	4,2928	1,4309	3,78	0,005	**
241	4,44	3,9481	1,3160	3,37	0,009	**
242	1,33	1,0148	0,3382	3,35	0,010	**
243	4,92	4,9098	1,6366	3,01	0,017	*
244	3,20	2,2011	0,7337	4,36	0,002	**
245	2,03	2,5219	0,8406	2,42	0,042	*
247	3,71	5,5754	1,8584	1,99	0,081	ns

Tabela D.3 - Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t $|t|$ e da probabilidade de rejeição da média (d) para o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamento 1 e 2).

Dia Juliano	$d^{(1)}$	$\sigma_d^{(2)}$	EPM ⁽³⁾	Valor $ t $	$p > t ^{(4)}$	N.S. ⁽⁵⁾
174	- 0,05	0,0809	0,0269	1,82	0,106	ns
178	- 0,05	0,0771	0,0257	2,01	0,069	ns
179	- 0,03	0,0844	0,0281	0,89	0,397	ns
182	0,09	0,1307	0,0436	2,00	0,081	ns
184	0,06	0,0911	0,0304	1,88	0,097	ns
85	0,10	0,0847	0,0282	3,66	0,006	**
186	0,14	0,2137	0,0712	1,98	0,084	ns
194	0,09	0,0695	0,0284	3,27	0,022	*
195	0,11	0,0615	0,0251	4,49	0,006	**
198	0,08	0,0523	0,0214	3,56	0,016	*
202	0,13	0,0774	0,0316	4,00	0,010	**
204	0,05	0,1519	0,0620	0,73	0,499	ns
205	0,07	0,0484	0,0161	4,67	0,002	**
206	0,07	0,0462	0,0154	4,67	0,002	**
207	0,03	0,0856	0,0285	0,94	0,373	ns
208	0,06	0,0443	0,0148	3,95	0,004	**
210	0,07	0,0578	0,0193	3,64	0,007	**
211	0,07	0,0552	0,0184	4,00	0,004	**
213	0,06	0,0461	0,0154	4,02	0,004	**
219	0,08	0,0710	0,0237	1,05	0,008	**
220	0,08	0,0679	0,0226	3,49	0,009	**
221	0,09	0,0673	0,0224	3,37	0,005	**
222	0,09	0,0736	0,0246	3,78	0,007	**
224	0,09	0,0746	0,0248	3,60	0,007	**
225	0,10	0,0870	0,0290	3,51	0,008	**
228	0,11	0,0913	0,0304	3,71	0,006	**
229	0,10	0,0794	0,0265	3,70	0,006	**
232	0,14	0,0838	0,0279	4,80	0,001	**
234	0,14	0,1058	0,0352	3,91	0,004	**
236	0,12	0,1081	0,0360	3,37	0,009	**
239	0,12	0,1356	0,0452	2,68	0,028	*
240	0,12	0,1392	0,0464	2,53	0,035	*
241	0,10	0,1406	0,0468	2,05	0,075	ns
242	4,04	4,3809	1,4603	2,77	0,024	*
243	0,10	0,1615	0,0538	1,85	0,100	ns
244	0,02	0,1045	0,0348	0,53	0,612	ns
245	0,08	0,1265	0,0422	2,02	0,078	ns
247	0,06	0,1148	0,0382	1,69	0,128	ns

Tabela D.4- Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste $t | t |$ e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM_3 , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamento 1 e 3).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor t	$p > t $	N.S.
195	- 0,13	0,4320	0,1763	0,75	0,484	ns
198	- 0,10	0,3162	0,1290	0,77	0,474	ns
202	- 0,28	0,5192	0,2120	1,34	0,239	ns
204	0,05	0,1974	0,0806	0,62	0,562	ns
205	- 0,11	0,3756	0,1252	0,89	0,400	ns
206	- 0,24	0,3395	0,1132	2,15	0,063	ns
207	0,01	0,3983	0,1327	0,08	0,935	ns
208	- 0,28	0,3598	0,1199	2,31	0,049	*
210	0,02	0,1093	0,0364	0,60	0,558	ns
211	- 0,01	0,1763	0,0587	0,19	0,855	ns
213	- 0,19	0,4833	0,1611	1,27	0,275	ns
219	- 0,39	0,4833	0,1611	2,41	0,047	*
220	- 0,53	0,3082	0,1027	5,19	0,001	**
221	- 0,59	0,5797	0,1932	3,05	0,015	*
222	- 0,57	0,2784	0,0928	6,01	0,001	**
224	- 0,98	0,7817	0,2605	3,79	0,005	**
225	- 0,82	0,4086	0,1361	6,04	0,001	**
228	- 1,17	0,7000	0,2333	5,00	0,001	**
229	- 0,90	0,5172	0,1724	5,22	0,001	**
232	- 1,18	0,9795	0,3265	3,60	0,007	**
234	- 1,42	0,9297	0,3099	4,58	0,002	**
236	- 1,93	1,2329	0,4109	4,70	0,001	**
239	- 1,93	1,0235	0,3411	5,67	0,005	**
240	- 1,61	1,2624	0,4207	3,83	0,005	**
241	- 1,95	0,6559	0,2186	8,94	0,001	**
242	- 0,67	3, 0413	1,0137	0,65	0,529	ns
243	- 2,44	0,9658	0,3219	7,59	0,001	**
244	- 1,11	2,6113	0,8737	1,27	0,239	ns
245	- 1,82	0,7645	0,2548	7,15	0,001	**
247	- 4,02	1,5722	0,5240	7,67	0,001	**

Tabela D.5- Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância correspondente a banda TM_4 , do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura do trigo. (Tratamento 1 e 3).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor $ t $	$p > t $	N.S.
195	- 13,30	6,3751	2,6026	5,13	0,004	**
198	- 10,52	5,0866	2,0766	5,06	0,004	**
202	- 13,45	11,9817	4,8915	2,74	0,040	*
204	- 9,73	2,5812	1,0537	9,24	0,001	**
205	- 9,84	6,1769	2,0589	4,78	0,009	**
206	- 11,65	5,2763	1,7587	6,62	0,001	**
207	- 6,66	8,4675	2,8225	2,36	0,045	*
208	- 11,70	6,1854	2,0618	5,67	0,001	**
210	- 5,27	4,0071	1,3357	3,94	0,004	**
211	- 6,42	4,1209	1,3736	4,67	0,002	**
213	- 6,38	7,2170	2,4056	2,65	0,029	*
219	- 2,88	7,2253	2,4084	1,19	0,264	ns
220	- 4,47	5,1203	1,7067	2,62	0,031	*
221	- 3,31	3,3408	1,1136	2,97	0,017	*
222	- 1,84	3,1650	1,0550	1,74	0,118	ns
224	- 2,99	6,2456	2,0818	1,43	0,189	ns
225	- 2,89	3,4268	1,1422	2,52	0,035	*
228	- 3,70	4,0524	1,3508	2,74	0,025	*
229	- 0,93	3,1874	1,0624	0,88	0,405	ns
232	- 1,49	2,8224	0,9408	1,58	0,152	ns
234	- 2,04	3,7586	1,2528	1,63	0,141	ns
236	- 3,12	3,6197	1,2065	2,59	0,032	*
239	- 1,63	4,4354	1,4784	1,10	0,301	ns
240	- 0,54	5,1398	1,7132	0,32	0,758	ns
241	- 1,69	4,3166	1,4389	1,17	0,274	ns
242	- 1,44	3,0378	1,0125	1,42	0,192	ns
243	- 1,62	4,8290	1,6096	1,01	0,343	ns
244	- 2,13	3,8791	1,2930	1,65	0,137	ns
245	- 1,51	2,1239	0,7079	2,13	0,065	ns
247	- 4,17	4,7259	1,5753	2,65	0,029	*

Tabela D.6- Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t | t | e da probabilidade de rejeição da média (d) para o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamento 1 e 3).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor t	p > t	N.S.
195	- 0,07	0,0372	0,0151	4,49	0,006	**
198	- 0,05	0,0140	0,0057	8,79	0,001	**
202	- 0,03	0,0140	0,0057	5,99	0,002	**
204	- 0,06	0,0251	0,0103	6,35	0,001	**
205	- 0,03	0,0156	0,0052	5,68	0,001	**
206	- 0,03	0,0137	0,0045	6,14	0,001	**
207	- 0,04	0,0495	0,0165	2,27	0,052	ns
208	- 0,03	0,0123	0,0041	6,58	0,001	**
210	- 0,03	0,0176	0,0058	4,63	0,002	**
211	- 0,03	0,0185	0,0062	4,43	0,002	**
213	- 0,01	0,0235	0,0078	1,42	0,193	ns
219	0,01	0,0359	0,0119	1,24	0,252	ns
220	0,02	0,0381	0,0127	1,23	0,254	ns
221	0,03	0,0405	0,0135	1,72	0,124	ns
222	0,04	0,0469	0,0156	2,60	0,032	*
224	0,05	0,0506	0,0169	2,82	0,022	*
225	0,04	0,0337	0,0112	3,56	0,007	**
228	0,05	0,0319	0,0106	4,70	0,002	**
229	0,06	0,0469	0,0156	3,73	0,006	**
232	0,06	0,0678	0,0226	2,54	0,034	*
234	0,08	0,0668	0,0223	3,56	0,007	**
236	0,08	0,0829	0,0276	2,95	0,018	*
239	0,09	0,0847	0,0285	3,29	0,011	*
240	0,10	0,0841	0,0280	3,50	0,008	**
241	0,08	0,0938	0,0312	2,66	0,028	*
242	- 1,94	6,3739	2,1247	0,91	0,387	ns
243	0,09	0,0819	0,0273	3,62	0,007	**
244	0,01	0,0925	0,0308	0,11	0,908	ns
245	0,07	0,0597	0,0199	3,56	0,007	**
247	0,06	0,0711	0,0237	2,76	0,024	*

Tabela D.7 - Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t $|t|$ e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM_3 do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamento 1 e 4).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor $ t $	$p > t $	N.S.
219	- 0,05	0,3678	0,1226	0,45	0,662	ns
220	- 0,08	0,2667	0,0888	1,00	0,347	ns
221	- 0,01	0,3516	0,1172	0,01	0,926	ns
222	- 0,13	0,1870	0,0624	2,13	0,065	ns
224	- 0,27	0,3240	0,1080	2,47	0,038	*
225	- 0,20	0,1225	0,0408	4,90	0,001	**
228	- 0,83	0,2783	0,0928	8,98	0,001	**
229	- 0,97	0,4576	0,1525	6,41	0,001	**
232	- 1,42	0,4816	0,1605	8,85	0,001	**
234	- 0,79	0,3551	0,1184	6,66	0,001	**
236	- 1,65	0,4773	0,1591	10,40	0,001	**
239	- 1,70	0,5267	0,1755	9,68	0,001	**
240	- 1,52	0,4522	0,1507	10,09	0,001	**
241	- 1,69	0,6193	0,2064	8,18	0,001	**
242	- 1,00	1,5000	0,5000	2,00	0,080	ns
243	- 1,82	1,2872	0,4291	4,25	0,003	**
244	- 0,51	2,1825	0,7275	0,70	0,502	ns
245	- 2,17	1,8186	0,6062	3,57	0,007	**
247	- 2,87	1,2479	0,4159	6,89	0,001	**

Tabela D.8 - Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t | t | e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM₄ do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamento 1 e 4).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor t	p > t	N.S.
219	- 8,11	7,1336	2,3778	3,41	0,009	**
220	- 7,37	5,2654	1,7551	4,19	0,003	**
221	- 6,12	5,4636	1,8212	3,36	0,009	**
222	- 5,23	3,8461	1,2820	4,08	0,004	**
224	- 5,26	6,5599	2,1866	2,41	0,043	*
225	- 2,59	4,2001	1,4000	1,85	0,101	ns
228	- 3,14	3,8386	1,2795	2,45	0,039	*
229	- 3,19	3,5890	1,1963	2,66	0,028	*
232	0,52	2,2207	0,7402	0,71	0,500	*
234	0,88	3,0122	1,0040	0,88	0,401	ns
236	- 1,88	5,0694	1,6898	1,11	0,298	ns
239	- 2,07	4,4592	1,4864	1,39	0,202	ns
240	- 2,33	3,7509	1,2503	1,87	0,099	ns
241	- 3,04	3,3697	1,1232	2,71	0,027	*
242	- 0,45	2,8469	0,9489	0,48	0,644	ns
243	- 2,64	6,1774	2,0591	1,28	0,235	ns
244	- 1,95	4,1349	1,3783	1,42	0,194	ns
245	- 4,09	4,7477	1,5825	2,58	0,032	*
247	- 4,95	2,8688	0,9562	5,18	0,001	**

Tabela D.9 - Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t $|t|$ e da probabilidade de rejeição da média (d) para o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamentos 1 e 4).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor $ t $	$p > t $	N.S.
219	- 0,03	0,0180	0,0059	5,03	0,001	**
220	- 0,03	0,0181	0,0061	4,41	0,002	**
221	- 0,03	0,0152	0,0051	5,95	0,001	**
222	- 0,02	0,0178	0,0059	3,80	0,005	**
224	- 0,01	0,0268	0,0089	1,48	0,175	ns
225	- 0,01	0,0327	0,0109	0,27	0,792	ns
228	0,03	0,0303	0,0101	3,38	0,009	**
229	0,04	0,0275	0,0092	3,96	0,004	**
232	0,10	0,0485	0,0161	6,21	0,001	**
234	0,09	0,0681	0,0227	3,72	0,006	**
236	0,09	0,0616	0,0205	4,30	0,003	**
239	0,07	0,0846	0,0282	2,63	0,030	*
240	0,06	0,0789	0,0263	2,07	0,071	ns
241	0,04	0,0862	0,0287	1,32	0,223	ns
243	0,04	0,0774	0,0258	1,68	0,131	ns
244	- 0,02	0,0944	0,0314	0,66	0,523	ns
245	0,02	0,0680	0,0219	0,69	0,506	ns
247	0,01	0,0689	0,0229	0,39	0,705	ns

Tabela D.10- Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t | t | e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM₃ do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamentos 1 e 5).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor t	p > t	N.S.
239	0,00	0,5361	0,1787	0,00	1,000	ns
241	0,11	0,7287	0,2429	0,45	0,659	ns
242	1,00	1,5000	0,5000	2,00	0,081	ns
243	- 0,58	0,7546	0,2515	2,30	0,051	ns
244	0,72	1,8281	0,6094	1,18	0,269	ns
245	- 1,13	1,7678	0,5892	1,92	0,091	ns
247	- 1,20	0,8930	0,2976	4,03	0,004	**

Tabela D.11- Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t | t | e da probabilidade de rejeição da média (d) para o fator de reflectância na banda TM₄ do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamentos 1 e 5).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor t	p > t	N.S.
239	0,52	1,7326	0,5775	0,90	0,392	ns
241	1,31	2,3481	0,7827	1,67	0,132	ns
242	1,19	1,6736	0,5578	2,13	0,066	ns
243	- 0,29	1,4785	0,4928	0,58	0,574	ns
244	2,42	4,3384	1,4461	1,67	0,132	ns
245	- 1,19	3,6699	1,2233	0,97	0,359	ns
247	- 0,94	1,2788	0,4262	2,21	0,067	ns

Tabela D.12 - Resultados da média (d), do desvio padrão da média (σ_d), do erro padrão da média (EPM), do valor absoluto do teste t | t | e da probabilidade de rejeição da média (d) para o índice de vegetação diferença normalizada (NDVI), do início da suspensão da água até o final do ciclo da cultura (tratamentos 1 e 5).

Dia Juliano	d	σ_d	EPM	Valor t	p > t	N.S.
239	0,01	0,0386	0,0128	0,49	0,639	ns
241	0,02	0,0529	0,0176	0,87	0,405	ns
242	5,26	5,5684	1,8561	2,84	0,022	*
243	0,02	0,0284	0,0094	2,60	0,032	*
244	0,03	0,0283	0,0094	2,68	0,027	*
245	0,04	0,0406	0,0135	2,60	0,032	*
247	0,03	0,0324	0,0108	2,60	0,032	*

APÊNDICE E

**RESULTADOS DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DO TESTE LSD PARA
GERMINAÇÃO (G), COMPRIMENTO DA SEMENTE (C), LARGURA (L) E
ESPESSURA DO GRÃO (E)**

Tabela E.1 - Análise de variância e teste LSD para germinação (Germ.), comprimento (Comp.), largura (Larg.) e espessura do grão (Esp)

Tratamento	Germ. (%)	D.R. (%)	Comp. (mm)	D.R. (%)	Largura (mm)	D.R. (%)	Esp. (mm)	D.R. (%)
Testemunha	100,0	-	6,21	-	3,03 a	-	2,74 a	-
Perfilhamento	100,0	0,0	6,22	0,2	3,04 a	0,3	2,81 a	2,5
Espigamento	100,0	0,0	6,00	- 3,4	2,97 a	- 1,9	2,66 ab	- 2,9
Enchimento	100,0	0,0	6,22	0,2	2,84 b	- 6,3	2,50 b	- 8,8
Maturação	99,3	- 0,7	6,11	- 1,6	2,98 a	- 1,6	2,69 ab	- 1,8
Valor F	1,00 ns	-	0,60 ns	-	4,81 *	-	3,93 *	-
LSD (0,05)	-	-	-	-	0,121	-	0,187	-
CV (%)	0,51	-	3,55	-	2,16	-	3,72	-

APÊNDICE F

**DADOS METEOROLÓGICOS COLETADOS NA ESTAÇÃO
METEOROLÓGICA DA ESALQ/USP NOS MÊSES DE JUNHO, JULHO E
AGOSTO**

F.1 - Dados meteorológicos do mês de junho

Dia/mês	R. Global cal. cm ⁻² d ⁻¹	Insolação h d ⁻¹	Precipit. (mm)	U. Relat. (%)	Vento máximo (m/s)	Tempet. máxima (°C)	Temp. mínima (°C)	evapor. (mm)
1	338	9.3	0.0	78.0	6.0	26.0	9.0	2.94
2	313	8.4	0.0	73.0	4.7	26.8	10.3	3.57
3	312	9.4	0.0	82.0	4.5	25.2	11.4	2.98
4	318	6.8	0.0	75.0	2.2	25.4	9.6	3.60
5	323	8.4	0.0	75.0	3.0	26.2	6.4	1.36
6	315	9.7	0.0	74.0	5.2	27.0	8.9	3.26
7	329	9.7	0.0	75.0	4.5	28.0	10.9	3.50
8	282	8.5	0.0	77.0	5.4	27.6	9.9	1.80
9	315	8.2	0.0	73.0	3.7	28.2	11.2	5.06
10	339	9.2	0.0	68.0	3.7	27.6	9.2	3.97
11	311	9.7	0.0	73.0	4.2	28.4	10.6	3.27
12	391	8.8	0.0	82.0	1.0	27.6	10.6	2.64
13	290	9.3	0.0	78.0	3.9	27.6	9.6	2.44
14	306	8.8	0.0	77.0	1.0	27.5	10.6	3.22
15	307	8.5	0.0	73.0	3.0	28.1	10.1	3.00
16	242	8.1	0.0	68.0	5.0	28.5	14.7	3.82
17	122	1.6	2.7	92.0	11.0	24.6	12.9	0.49
18	105	0.1	10.2	98.0	4.3	21.6	15.0	0.99
19	177	2.6	0.0	88.0	4.7	21.4	13.2	2.40
20	342	9.0	0.0	83.0	6.0	22.6	10.4	3.00
21	227	3.5	0.0	87.0	2.2	22.8	9.0	1.64
22	296	6.9	0.0	83.0	2.0	27.0	11.2	2.12
23	319	8.8	0.0	60.0	3.4	28.0	11.1	3.16
24	303	8.1	0.0	70.0	4.3	27.4	12.0	3.99
25	93	0.2	10.6	97.0	22.6	18.8	17.3	2.17
26	249	6.2	0.0	89.0	3.2	24.8	14.0	2.50
27	309	8.3	0.0	81.0	1.0	29.2	12.1	2.86
28	320	9.6	0.0	73.0	4.8	29.8	12.4	3.30
29	170	0.4	0.0	86.0	3.9	21.9	15.1	1.70
30	275	6.5	0.0	87.0	4.0	23.1	11.4	2.00

F.2 - Dados meteorológico para o mês de julho

Dia/mês	R. Global cal. cm ⁻² d ⁻¹	Insolação h d ⁻¹	Precipit. (mm)	U. Relat. (%)	Vento máximo (m/s)	Tempet. máxima (°C)	Temp. mínima (°C)	Eapor. (mm)
1	315	8.1	0.0	73	1.0	26.8	10.4	3.06
2	311	9.0	0.0	77	3.1	28.5	11.0	2.86
3	305	9.6	0.0	77	3.4	28.4	13.0	3.40
4	311	9.3	0.0	81	4.8	26.3	13.3	3.54
5	317	8.2	0.0	72	5.0	28.3	11.5	3.33
6	297	8.5	0.0	66	9.7	29.0	15.6	3.61
7	258	6.6	0.5	70	10.0	29.5	15.9	4.30
8	81	0.0	7.2	98	4.0	16.7	13.8	0.24
9	62	0.0	44.1	90	2.0	17.4	14.7	1.00
10	153	3.0	1.0	93	1.0	22.7	15.2	1.50
11	327	7.2	0.0	86	1.0	25.2	10.0	2.37
12	319	7.8	0.0	77	2.5	27.1	10.2	2.97
13	312	9.6	0.0	77	1.0	28.7	11.1	3.16
14	291	6.8	0.0	74	2.0	29.0	12.0	2.30
15	189	1.8	0.0	81	1.0	28.2	15.0	2.11
16	194	2.2	0.0	80	1.0	28.8	17.6	2.72
17	302	7.8	0.0	74	4.2	29.3	14.4	3.08
18	284	6.1	0.0	72	5.10	26.7	14.1	3.52
19	257	3.6	0.0	62	12.0	28.0	12.0	4.28
20	134	0.8	0.4	92	12.7	20.4	17.9	1.78
21	185	2.9	5.9	95	7.2	21.2	11.2	1.72
22	219	4.8	0.0	92	2.0	20.2	11.0	1.26
23	305	5.9	0.0	82	1.0	25.1	7.7	2.28
24	344	9.7	0.0	72	2.5	29.3	9.7	3.32
25	338	9.6	0.0	72	1.0	29.6	11.1	3.96
26	342	8.8	0.0	71	3.8	29.4	12.6	3.72
27	317	9.1	0.0	72	6.6	29.5	12.0	3.39
28	374	9.7	0.0	63	7.1	29.7	15.1	6.13
29	359	8.7	0.0	67	2.5	31.0	14.8	4.60
30	347	9.7	0.0	74	2.9	30.0	12.9	2.40
31	345	9.5	0.0	72	1.0	30.3	12.3	3.94

F.3 - Dados meteorológicos do mês de agosto

Dia/mês	R. Global cal. cm ⁻² d ⁻¹	Insolação h d ⁻¹	Precipit. (mm)	U. Relat. (%)	Vento máximo (m/s)	Tempet. máxima (°C)	Temp. mínima (°C)	Eapor. (mm)
1	356	9.8	0.0	69	4.0	29.2	12.4	5.10
2	360	9.8	0.0	71	6.2	29.4	10.3	4.66
3	335	7.8	0.0	68	3.0	31.5	13.0	3.14
4	302	5.4	0.9	84	8.3	23.4	14.9	5.08
5	128	0.0	0.3	92	5.5	16.8	13.5	1.92
6	326	6.3	0.0	88	4.8	23.8	12.0	2.76
7	348	9.5	0.0	82	5.0	31.6	12.5	4.04
8	312	7.8	0.0	76	4.5	32.0	16.3	4.16
9	314	8.0	0.0	73	5.0	31.4	15.7	5.22
10	351	8.5	0.0	72	5.8	31.9	14.6	4.49
11	-	9.5	0.0	71	1.0	31.3	13.0	5.02
12	342	8.7	0.0	72	5.7	32.3	13.2	5.14
13	374	9.7	0.0	70	1.0	32.6	13.4	4.56
14	396	10.1	0.0	68	5.5	33.3	11.9	5.98
15	381	10.0	0.0	65	9.9	32.6	12.8	6.46
16	351	9.3	0.0	76	6.0	32.0	13.6	3.41
17	383	9.6	0.0	76	10.3	28.3	14.6	4.42
18	377	9.2	0.0	55	4.5	30.6	12.4	5.46
19	389	9.8	0.0	73	4.6	26.4	14.4	5.76
20	392	9.1	0.0	77	5.0	27.4	12.6	4.48
21	384	9.8	0.0	70	5.2	29.4	11.1	4.16
22	380	8.6	0.0	61	4.5	30.4	12.6	3.80
23	402	10.0	0.0	56	7.6	31.1	12.8	5.60
24	419	10.2	0.0	57	6.4	31.5	13.2	5.88
25	408	10.2	0.0	57	6.0	31.6	10.8	5.90
26	443	10.5	0.0	59	6.3	31.5	10.8	5.54
27	443	10.5	0.0	58	6.9	32.5	12.5	6.08
28	422	10.6	0.0	54	4.7	32.6	13.0	3.61
29	423	10.5	0.0	57	5.0	33.6	14.1	6.11
30	414	10.3	0.0	50	5.0	34.5	12.8	6.90
31	411	10.0	0.0	53	9.3	34.3	13.6	5.60